

CESTOVNÍ MAPA VODÍKOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ V ČESKÉ REPUBLICCE

Mgr. Jan Sochor a kolektiv autorů

Aktualizovaná verze

k 30. 6. 2023



EVROPSKÁ UNIE
Evropský fond pro regionální rozvoj
Operační program Podnikání
a inovace pro konkurenceschopnost

PROJEKT „ČESKÁ VODÍKOVÁ TECHNOLOGICKÁ PLATFORMA 2023“
CZ.01.1.02/0.0/0.0/20_369/0025119

Obsah

Cíl dokumentu	3
1. Úvod	4
2. Manažerské shrnutí	5
3. Současný stav vodíkového hospodářství v České republice	9
4. Technologická a komerční připravenost vybraných klíčových technologií v kontextu rozvoje vodíkového hospodářství	13
4.1 Technologie zajišťující výrobu obnovitelného a nízkouhlíkového vodíku	13
4.2 Technologie sloužící ke skladování a přepravě vodíku	21
4.3 Technologie, které zajišťují využití vodíku jako paliva a suroviny	26
5. Podmínky unijní legislativy a její možné důsledky pro Českou republiku	30
5.1 Revize směrnice o obnovitelných zdrojích energie	31
5.2 Akt v přenesené pravomoci k výrobě obnovitelných paliv nebiologického původu	33
5.3 Revize nařízení o zavádění infrastruktury pro alternativní paliva (AFIR)	36
5.4 Směrnice o společných pravidlech pro vnitřní trh s plyny z obnovitelných zdrojů, se zemním plynem a s vodíkem a nařízení o vnitřním trhu s obnovitelnými plyny, zemním plynem a vodíkem	37
6. Potenciál vodíkového hospodářství v jednotlivých sektorech ve světě a v České republice	39
6.1 Výroba vodíku v ČR	40
6.2 Sektor chemického průmyslu	41
6.3 Sektor ocelářství	43
6.4 Sektor dopravy	44
6.5 Sektor energetiky	45
7. Legislativní, technické a další výzvy v otázce rozvoje vodíkových aplikací v České republice	48
8. Vzdělávání v oblasti vodíkových technologií	50
8.1 Základní školství	50
8.2 Střední školství	50
8.3 Vysoké školství	50
8.4 Navazující vzdělávání	51
8.5 Osvěta veřejnosti	51
9. Doporučená opatření pro rozvoj vodíkového hospodářství v České republice	52
9.1 Dlouhodobá obecná doporučení	52
9.2 Doporučení v oblasti evropské legislativy	52
9.3 Doporučení v oblasti národní legislativy	53
9.4 Doporučení v oblasti vzdělávání	53
Seznam zkratk	54

Cíl dokumentu

Identifikace příležitostí a výzev rozvoje vodíkového hospodářství v České republice v návaznosti na současných stav a budoucí možná využití vodíku v jednotlivých sektorech. Cílem dokumentu je mimo jiné upozornit a připravit Českou republiku na dopady rychle se rozvíjejícího využívání vodíku v návaznosti na připravovanou legislativu Evropské unie. Cílem tohoto dokumentu je zároveň zvýšit připravenost malých a středních podniků na nástup pokročilých technologií, které vyžadují kombinaci různých kompetencí a inovativních řešení a které mohou přispět k rozvoji nových meziodvětvových hodnotových řetězců.

1. Úvod

Cestovní mapa rozvoje vodíkové hospodářství v České republice je dokument zpracovaný v rámci projektu „Česká vodíková technologická platforma 2023“ CZ.01.1.02/0.0/20_369/0025119 podpořeného z operačního programu OP PIK Spolupráce – Technologické platformy. Dokument byl zpracován autorským kolektivem platformy, konkrétně Ing. Alešem Douckem, Ph.D., Doc. Ing. Martinem Paidarem, Ph.D., Ing. Veronikou Vohlídkovou, Ing. Jiřím Vávrou Ph.D. a Ing. Václavem Bystrianským, Ph.D. Vedoucím pracovníkem dokumentu je Mgr. Jan Sochor. Dokument bude průběžně aktualizován o nejnovější vývoj na poli zejména vodíkové legislativy a navazujících cílů vodíkové hospodářství i po skončení projektu.

Dokument nastiňuje současný stav vodíkové hospodářství k 30. červnu 2023, včetně podmínek unijní legislativy, legislativních a technických výzev a dalších kapitol zaměřujících se komplexně na rozvoj vodíkové ekonomiky a vybraných vodíkových technologií. Cílem dokumentu je kriticky zhodnotit potenciál vodíkové hospodářství a společně s tím popsat konkrétní kroky k rozvoji vodíkové hospodářství v České republice.

2. Manažerské shrnutí

Rozvoj vodíkového hospodářství v České republice zrychluje. Míra využití vodíku se bude lišit v závislosti na úrovni postupující dekarbonizace a technologickém pokroku jak na straně výroby a využití vodíku, tak na straně konkurenčních technologií.

Současné výroba a využití vodíku v České republice je spojena s chemickou výrobou

Vodík je v České republice dominantně vyráběn parciální oxidací ropných zbytků, následovanou parním reformingem zemního plynu. Další typy výroby jsou specifické pro svou nepostradatelnou integraci do řady navazujících chemických procesů. Vodík se využívá v sektoru rafinace pro hydrogenaci a hydrokrakování k výrobě fosilních paliv, v návaznosti na chemické procesy výroby anilínu, či styrenu, nebo chloralkalickou výrobou solanky, nebo k výrobě čpavku. Ročně se v ČR vyrobí a spotřebuje přibližně 100 tisíc tun vodíku. Výroba vodíku je aktuálně spojena s jeho okamžitou spotřebou v daném místě.

Iniciativu rozvoje vodíku v nových aplikacích přebírá Ústecký a Moravskoslezský kraj

Ústecký a Moravskoslezský kraj jsou v době vydání Cestovní mapy hlavním iniciátorem vodíkových záměrů v České republice. Oba kraje mají možnost financování z Operačního programu Spravedlivé transformace. Ústecký kraj v dubnu roku 2022 vydal svou Vodíkovou strategii Ústeckého kraje, která vidí potenciál vodíku zejména v oblasti dekarbonizace průmyslu a vodíkové mobility, a to zejména v kontextu městské hromadné dopravy, na železnici a v lodní dopravě. Kromě praktických aplikací usiluje kraj na svém území o prioritizaci vodíku v sektoru výzkumu, vývoje a vzdělávání. Ústecký kraj je oficiálním Evropským vodíkovým údolím. Kromě spotřeby, vývoji a výzkumu vzniká v kraji řada projektů na výrobu obnovitelného vodíku, a to například v průmyslové zóně Triangle poblíž Žatce.

Společně s Ústeckým krajem je vodík zásadním tématem i pro Moravskoslezský kraj, který v červenci 2022 inicioval založení Vodíkového klastru, tedy sdružení tamních stakeholderů. Sdružení má za cíl koordinovat jednotlivé vodíkové projekty a vytvořit souvislou vodíkovou ekonomiku od nabídky až po poptávku. První ohlášené projekty se zaměřují zejména na rozvoj hromadné a příměstské hromadné dopravy a výrobu vodíku z elektřiny z obnovitelných zdrojů. Jedna z takových výroby se plánuje ve Frýdku-Místku a v Krnově v návaznosti na tamní teplárny.

Pro výrobu obnovitelného vodíku nemá Česká republika nejvhodnější podmínky

Česká republika není s ohledem na evropsky preferovaný rozvoj obnovitelného vodíku ve výhodné pozici. Obnovitelné zdroje, a to jak sluneční, tak větrné, nemají neoptimálnější koeficienty využití v porovnání s některými okolními evropskými státy. Tento faktor je navíc umocněn zdoluhavými stavebními řízeními zejména u větrné energetiky. Právě větrná energetika ale je nezbytným předpokladem pro výrobu elektřiny pohánějící elektrolyzu vody, jež je legislativně nejpreferovanější výrobou vodíku v Evropě. Přesto se v Evropě, a to i v České republice do roku 2030 očekává podpora výroby obnovitelného vodíku v místě spotřeby, a tedy i v České republice. Spotřeba je navíc umocněna povinnými cíli směrnice na podporu využívání obnovitelných zdrojů energie, které Česká republika v Radě Evropské unie odsouhlasila. To si vyžádá v krajním případě povinnou spotřebu přibližně 36 tisíc tun obnovitelného vodíku v roce 2030 pro český průmysl. Této spotřeby bez adekvátní státní podpory nepůjde dosáhnout z ekonomických důvodů. Okolo roku 2030 se očekává nástup vodíku v přepravní infrastruktuře, a to i v České republice.

Unie komplexně podporuje výrobu obnovitelného vodíku, umožňuje ale i výrobu z nízkoemisních zdrojů

Povinnosti, které budou členskými státy a jednotlivými společnostmi vyplývat z projednávané nebo schválené unijní legislativy zahrnují i cíle pro vodík v oblasti dopravy a průmyslu. Obnovitelný vodík, který unijní legislativa definuje pod pojmem obnovitelná paliva nebiologického původu (RFNBO) lze vyrábět podle přísných podmínek časové a geografické korelace. Zdroje OZE, které je možné využít, nesmí být v principu starší 36 měsíců od spuštění elektrolýzy tak, aby se zamezilo využívání starších elektráren. Šedý vodík budou muset vodíkem obnovitelným do roku 2030 nahrazovat průmyslové parky, vyrábějící především methanol, čpavek a další chemické látky. Zpravidla se povinnost nevyhne těm, kteří vyrábí vodík parním reformováním zemního plynu. Kromě průmyslu budou od roku 2030 muset plnit dodavatelé paliv na území České republiky povinný cíl a dodat tak obnovitelná paliva nebiologického původu, mezi které se řadí obnovitelný vodík, nebo syntetická paliva, do daňového oběhu. Kromě povinností na straně spotřeby Evropská unie nově vyžaduje do roku 2030 postavit na hlavní síti TEN-T, tedy hlavních dálničních tazích a v městských uzlech, tedy krajských městech, plnicí stanice na vodík. To si minimálně vyžádá 16 plnicích stanic do roku 2030. Komise, Rada EU a Evropský parlament zároveň pracují na revizi plynárenské legislativy s cílem nastartovat přepravu vodíku plynovody s podpořit výrobu a využití nízkouhlíkového vodíku.

Vodík se uplatní tam, kde pro něj neexistuje adekvátní náhrada

Potenciál vodíku jako suroviny, nosiče a paliva je velký. Hlavním problémem nicméně zůstává malá, nebo neexistující infrastruktura jeho skladování, přepravy a distribuce. Vodíku se ve světě ročně vyrobí a spotřebuje podle dat Mezinárodní agentury pro energii (IEA) z roku 2021 přibližně 94 milionů tun, přičemž drtivá většina se vyrábí z fosilních paliv. Právě vodík vyráběný z fosilních paliv bude první nahrazovaný v rámci postupné tranzice k nízkouhlíkovému a obnovitelnému. Vodík bude i nadále používán pro výrobu čpavku a methanolu, lze očekávat, že sektor rafinace, který je dnes dominantním spotřebitelem vodíku na světě bude postupně podíl vyráběného a spotřebovaného vodíku snižovat. V České republice spotřebovává nejvíce vodíku celkem 5 společností, jedná se o společnost Orlen Unipetrol (rafinace a výroba čpavku), BorsodChem (výroba anilínu), Synthos Kralupy (výroba styrenu), Spolchemie (vodík jako vedlejší produkt z elektrolýzy solanky) a Deza (navazující chemické procesy).

Sektorem, který by se mohl v budoucnu stát masivním odběratelem vodíku je sektor ocelářství, kde využití obnovitelného nebo nízkouhlíkového vodíku vede k významnému snížení produkovaných emisí skleníkových plynů u nově vyráběné oceli, a to až na úroveň 50 kg CO₂ na 1 tunu vyrobené oceli. Jen v Evropě by si přechod na přímou redukci železné rudy a obloukové pece vyžádal podle reportu *Hydrogen Europe* přibližně 5,3 milionů tun obnovitelného vodíku ročně. V České republice by si podle Ocelářské unie vyžádal přechod k vodíku vyráběného elektrolýzou a obloukovým pecím dodatečnou spotřebu přibližně 20 TWh elektrické energie.

Vodík je perspektivním palivem pro pohon těžké nákladní, lodní a letecké dopravy. Osobní automobily na vodík jsou vlivem rozhodnutí automobilek zaměřit se zejména na bateriové elektromobily postupně upouzdovány. Potenciál vodíku, a to navzdory vyšší energetické náročnosti získávání a používání tohoto paliva v porovnání s přímou elektrifikací, je především v těžké nákladní dopravě, kde konkurenční technologie mohou narazit na limity distribuční soustavy a bateriových technologií samotných. Vodíkové nákladní automobily nabízejí již dnes dojezdy přes 800 km a doplnění paliva do 20 minut.

Energetika je posledním pomyslným sektorem, kde vodík s velkou pravděpodobností nalezne uplatnění. V případě jeho využití je možné skladovat energie na měsíce, jedná se tak o jedinou bezemisní technologii schopnou zajistit sezónní skladování v geologických strukturách o objemech v řádech stovek GWh. Energetický systém budoucnosti bude patrně složen z plynovodní přepravní infrastruktury se skladováním v řádech desítek možná i stovek TWh rozmístěných ve vhodných lokalitách. A vodík bude obchodován podobně, jako je dnes obchodován zemní plyn. Vodík je komplementárním řešením k přímé elektrifikaci a jako takový bude nezbytný pro zajištění správné funkčnosti elektrizační soustavy.

Řada vodíkových technologií je dnes na vysoké úrovni technologické připravenosti, přesto komercializace prozatím pokulhává

Technologie spojené s výrobou, skladováním, přepravou, distribucí a využitím vodíku jsou v různé fázi komercializace. Elektrolytická výroba vodíku je technologicky zvládnutá disciplína, kdy nejvyšší TRL (Technology Readiness Level) vykazuje alkalická a PEM technologie. Následovaná je technologií AEM a vysokoteplotní elektrolýzou. Největší výzvou pro elektrolýzery je v současné době navýšení výroba a celkově snižování investičních nákladů jednotlivých systémů. Elektrické účinnosti elektrolytické výroby se u všech dotčených technologií pohybují celosystémově od 50 do 84 %. Jiné typy výroby spojené s výrobou vodíku ze zemního plynu jsou v současné chvíli na industriální úrovni také technologicky zvládnuté. Potenciálními technologiemi s nižší úrovní připravenosti schopnými vyrábět vodík buďto nízkoemisní, nebo takřka bezemisně jsou parní a autotermální reforming zemního plynu s technologií zachytávání oxidu uhličitého, nebo pyrolýza metanu. Obzvláště pyrolýza metanu je pro svou absenci vypouštění přímých emisí do atmosféry zajímavou technologií do budoucna, její komerční nasazení ale zatím neproběhlo.

Skladování a přeprava vodíku je důležitým aspektem, který je nutné řešit, bez něhož se masové nasazení vodíku a jeho obchodování nerozvine. Standardně se dnes vodík převáží a skladuje ve stlačené formě, a to o různých tlacích. V mobilních aplikacích jsou používány celkem 4 typy nádrží, které se liší svou vahou a použitými materiály, v osobních automobilech při tlaku 700 barů se standardně používá nádrž typu 4, která je obalena uhlíkovými či skleněnými vlákny. Potenciální technologie pro skladování a přepravu vodíku do budoucna je i zkapalněný vodík. Největší nevýhodou je energetická náročnost zkapalnění vodíku, která dosahuje i více jak 30 % energie nutné pro zkapalnění vztaženo na uloženou energii v 1 kilogramu vodíku. Další nevýhodou je nízká teplota okolo -253 °C, při které je nutné vodík udržovat, kdy dochází k jeho odpařování. Výhodou je výrazně vyšší energetická hustota na objem, což dovoluje v trailerech po silnici přepravit i 3,5 tuny vodíku ve zkapalněné formě oproti přibližně 1 tuně v plynném skupenství (experimentální skladování, standardně se převáží 300 kg). Alternativou je skladovat a přepravovat vodík ve čpavku či methanolu.

Použití vodík se předpokládá kromě klasických spalovacích aplikací, tedy v plynových turbínách či spalovacích motorech i v palivových článcích, jejichž výhodou jsou nulové emise v místě spotřeby vodíku. Elektrická účinnost se pohybuje okolo 50 % v závislosti na režimu provozu. Jejich masová komercializace na úrovni současných bateriových systémů bude záležet od množství stacionárních a mobilních aplikací, ve kterých se vodík v budoucnu prosadí.

Nejzásadnější doporučená opatření pro rozvoj vodíkového hospodářství v České republice

- Česká republika by měla dlouhodobě podporovat rozvoj vodíkové ekonomiky prostřednictvím národních i evropských podpůrných mechanismů s jasným závazkem využití konkrétního množství finančních prostředků na rozvoj vodíkového hospodářství, a to v rámci programů jednotlivých ministerstev České republiky (OP TAK, OP Doprava, Modernizační fond, IPCEI projekty atd.)
- Česká republika by měla podpořit integrované projekty, které skloubí jak výrobu vodíku, tak jeho následné využití v sektorech dopravy, energetiky nebo průmyslu. Pro vodíkové projekty by bylo vhodné najít finanční instrumenty, které kromě podpory na straně výroby incentivizují i spotřebu vodíku (obzvláště v průmyslových aplikacích, kde přechod na vodík nemusí být vždy zprvu ekonomicky vhodný).
- Česká republika musí dlouhodobě podporovat všemi dostupnými prostředky import vodíku, a to zejména pomocí plynovodů k dosažení emisních cílů stanovených unijní legislativou. S tím se pojí politická prioritizace tématu českou politickou scénou, která v době vydání této cestovní mapy prakticky neexistuje.
- Česká republika by se měla zaměřit a výrazně urychlit rozvoj obnovitelných zdrojů energie, a to jak solárních, tak větrných, a to zařazením obnovitelných zdrojů do kategorie staveb ve veřejném zájmu v tzv. to-go zónách. Do těchto zón by měla zohlednit i výstavbu elektrolýzérů a navazující infrastruktury.

- Dlouhodobým cílem České republiky by mělo být posilování elektrizační soustavy z důvodu elektrifikace většiny sektorů a přechodu na obnovitelné zdroje energie.
- Rozvoj vodíkového hospodářství si vyžádá komplexní aktualizaci legislativního rámce České republiky (živnostenský zákon, stavební zákon, zákon o EIA, zákon o IPPC). Nejpozději během procesu transpozice směrnice o obnovitelných zdrojích energie a dekarbonizačního balíčku pro trh s plyny, by Česká republika měla předložit komplexní legislativní aktualizaci a doplnění vodíku do všech dotčených zákonů tak, aby podpořila jeho rozvoje napříč sektory mobility, průmyslu a v energetice.
- Česká republika by měla posílit technické vzdělávání na základních školách a poskytnout učitelům dostatek výukových materiálů vztaheným k praktickému využití technické vzdělávání v jednotlivých sektorech, včetně vodíkového hospodářství. A to zejména prostřednictvím spolupráce se zájmovými skupinami a technologickými platformami.
- Na středních školách by měla být poskytnuta dostatečná kvalita vzdělávacích materiálů, včetně metodické podpory výuky vodíkových technologií. Zásadním je poskytnout kombinované vzdělávání s částečnou kvalifikací v dalších oborech.
- Česká republika by dlouhodobě měla podporovat zavádění možnosti rekvalifikaci na vodíkové technologie, stavit granty a způsoby ověření této rekvalifikace.

3. Současný stav vodíkového hospodářství v České republice

Rozvoj vodíkového hospodářství v České republice zrychluje. Vodík je plyn, případně hluboce zmražená kapalina, jehož využití je spojováno se sektory dopravy, energetiky a dekarbonizace průmyslu, zejména ocelářství. Míra využití vodíku se bude lišit v závislosti na úrovni postupující dekarbonizace a technologickém pokroku jak na straně výroby a využití vodíku, tak na straně konkurenčních technologií. Vodík je v současnosti v České republice primárně vyráběn pro účely chemického průmyslu, případně jako vedlejší produkt vznikající při chlor-alkalické elektrolyze vody. Současná výroba a poptávka po vodíku v České republice se stabilně pohybuje okolo 100 tisíc tun spotřebovaného vodíku ročně^[1].

Největším výrobcem vodíku na našem území je společnost ORLEN Unipetrol RPA. Výroba asi 80 tisíc tun vodíku ročně se nachází v Litvínově a v Kralupech nad Vltavou. Dominantní metodou, která je pro účely získávání vodíku použita, je parciální oxidace ropných zbytků. Vyrobený vodík je využíván zejména jako chemická látka ve výrobě konvenčních paliv (benzín, nafta, kerosin) krakováním těžších ropných frakcí a k syntéze čpavku. Předpokládaná emisní náročnost vyrobeného vodíku se pohybuje přibližně okolo úrovně 15 kg CO₂ na 1 kg. Kromě výroby parciální oxidací ropných zbytků je v České republice rozšířena metoda výroby parního reformování zemního plynu, kterou v Ostravě (přes 10 tisíc tun vodíku ročně) provozuje společnost BorsodChem MCHZ. Ta využívá vodík k navazující výrobě řady chemických látek. Kromě výše zmíněných v České republice existují i další společnosti vyrábějící vodík pro další chemické využití. Mezi ty se řadí například společnost DEZA, situovaná ve Valašském Meziříčí, společnost Synthos nacházející se v Kralupech nad Vltavou, nebo společnost Spolchemie, lokalizovaná v Ústí nad Labem. Spolek pro chemickou a hutní výrobu (Spolchemie) jako jediná výroba v ČR produkuje 2 200 tun vodíku ročně pomocí technologie chlor-alkalické elektrolyzy vody.

Právě Spolchemii lze označit za jednu z nejvýznamnějších výroben vodíku v České republice s velkým potenciálem využití vodíku v netradičních sektorech do budoucna. To je dáno zejména povahou vyráběného vodíku, jež je vysoké čistoty a vzniká jako vedlejší produkt, který lze využít i pro další zamýšlené aplikace mimo chemický průmysl. Potenciál využití vodíku nikoliv jako suroviny, ale jako paliva a energetického nosiče je značný. I z toho důvodu si je Ústecký kraj, ve kterém se největší výrobní vodíku v České republice nachází, vědom tohoto potenciálu. Ten byl manifestován v dubnu roku 2022, kdy Hospodářská a sociální rada Ústeckého kraje publikovala vůbec první krajskou strategii pro oblast rozvoje vodíkového hospodářství s názvem „Vodíková strategie Ústeckého kraje“^[2]. Ta vidí potenciál vodíku zejména v oblasti dekarbonizace průmyslu a vodíkové mobility, a to s přihlédnutím k využití vodíku v městské hromadné dopravě, na železnici a v lodní dopravě. Krajské představitelé vnímají vodík také jako jednu z prioritních oblastí výzkumu, vývoje a vzdělávání a jsou připraveni jej podpořit financemi z Fondu spravedlivé transformace. Ústecký kraj se mimo jiné jako první kraj v České republice zapojil do iniciativy Evropských vodíkových údolí^[3]. Kromě využití stávající výroby vodíku se v kraji plánují projekty na výrobu obnovitelného vodíku v průmyslové zóně Triangle a navazující pilotní projekty^[4].

Kromě Ústeckého kraje je v České republice aktivní na poli rozvoje vodíkových technologií a vodíkového hospodářství i kraj Karlovarský. Ten v dubnu 2023 společně s Moravskoslezským a Ústeckým krajem podepsal memorandum

[1] „Hydrogen Demand“, oficiální stránka Fuel Cell and Hydrogen Observatory, <https://www.fchobservatory.eu/observatory/technology-and-market/hydrogen-demand>.

[2] Hospodářská a sociální rada Ústeckého kraje, *Vodíková strategie Ústeckého kraje*, <http://www.hsr-uk.cz/vodikova-strategie-usteckeho-kraje/>.

[3] Ústecký kraj, „Ústecký kraj je prvním českým regionem mezi evropskými vodíkovými údolími“, 9. března 2021, <https://www.kr-ustecky.cz/ustecky-kraj-je-prvnim-ceskym-regionem-mez-evropskymi-vodikovymi-udolimi/d-1753822>.

[4] Deník.cz, „Vodík jako surovina budoucnosti. Jeho výroba se chystá nedaleko Žatce“, 18. července 2022, https://zatecky.denik.cz/zpravy_region/vodik-vyroba-palivo-zatecko-triangle-20220718.html.

v oblasti podpory aplikace vodíkových technologií, tak rozvoje konceptu vodíkových údolí^[5]. Karlovarský kraj mimo jiné chystá rozvoj vodíku a vodíkových údolí v návaznosti na regionální program INTERREG, a to ve spolupráci s Bavorskem.

Podobně jako Ústecký a Karlovarský i Moravskoslezský kraj je bývalým uhelným krajem, do kterého směřují finance z Fondu spravedlivé transformace. Řada projektů, které se v současné chvíli na území kraje chystají je spojena se společnostmi a vzdělávacími institucemi, které zde dlouhodobě působí. V červenci 2022 založili stakeholderi spjatí s vodíkovým hospodářstvím tzv. *Vodíkový Klastr*, který má za cíl koordinovat jednotlivé vodíkové projekty a vytvořit souvislou vodíkovou ekonomiku od nabídky až po poptávku^[6]. Členy Klastru jsou kromě Moravskoslezského kraje i společnosti Cylinders Holding, Tatra, DPO, České dráhy, BorsodChem, ČEPRO, nebo třeba město Ostrava a Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava. Klastr bude pro začátek operovat s financemi o velikosti asi 1 miliardy korun z Fondu spravedlivé transformace. První projekty se zaměřují zejména na rozvoj městské hromadné dopravy, tedy nákup vodíkových autobusů a výstavbu vodíkových čerpacích stanic^[7]. Do budoucna se počítá s výstavbou elektrolyzérů napojených na obnovitelné zdroje energie, například ve Frýdku-Místku a v Krnově^[8].

Oba kraje jsou hnací silou rozvoje vodíkového hospodářství v konkrétních částech České republiky. Na národní úrovni byla v červenci roku 2021 vládou přijata *Vodíková strategie České republiky*, která popisuje realitu výroby zamýšleného obnovitelného a nízkouhlíkového vodíku v České republice a nastiňuje čtyři specifické cíle, kterých je nutné pro úspěšný rozvoj vodíkového hospodářství dosáhnout. Mezi tyto cíle patří zastřešující cíle navýšení výroby nízkouhlíkového vodíku, navýšení spotřeby nízkouhlíkového vodíku, připravenost infrastruktury na dopravu a skladování vodíku a rozvoj výzkumu, vývoje a výroby vodíkových technologií^[9]. V březnu 2023 začaly práce na aktualizaci Vodíkové strategie České republiky, které primárně reflektují legislativní realitu podpory obnovitelného vodíku. Nově se počítá s prioritizací výroby obnovitelného vodíku elektrolyzou na území České republiky a s postupnou přípravou přepravní infrastruktury na přechod ze zemního plynu k vodíku. Přestože Česká republika nemá vhodné podmínky k výrobě obnovitelného vodíku, obligatorní cíle unijní legislativy zavazují všechny členské státy spotřebovávat obnovitelný vodík v sektorech průmyslu a dopravy, a to již v roce 2030. I z tohoto důvodu lze předpokládat, že Česká republika podpoří výrobu obnovitelného vodíku z finančních prostředků na dekarbonizaci tak, aby zvládla splnit závazné cíle do doby, než bude k dispozici funkční přepravní infrastruktura a dostatečné kapacity pro dovoz vodíku.

Pro lepší ilustraci reality výroby obnovitelného vodíku je, ale nutné zmínit, že podle společnosti EGÚ Brno vyrábí průměrná solární elektrárna v ČR elektřinu v přepočtu na svůj špičkový instalovaný výkon asi 1 000 hodin ročně^{[10][11]}. V porovnání, koeficient využití instalovaného výkonu je u elektrárny postavené ve velmi slunném Španělsku je až 2000 hodin ročně^[12]. Už jen z tohoto důvodu nelze předpokládat, že by na evropské úrovni elektřina z fotovoltaické elektrárny vyrábějící v České republice mohla konkurovat té španělské. Přestože do této rovnice promlouvají i další proměnné, jakými jsou například kapacita přenosové soustavy, hustota zalidnění a další aspekty, v porovnání s některými státy Evropské unie, Česká republika nebude schopná dosáhnout obdobně nízké ceny u výroby

[5] Ministerstvo životního prostředí, „Hejtmani uhelných regionů podepsali na Ministerstvu životního prostředí vodíkové memorandum. Cílem je větší mezikrajská spolupráce pro rozvoj vodíkových technologií“, 4. dubna 2023 https://www.mzp.cz/news_20230404-Hejtmani-uhelných-regionů-podepsali-na-Ministerstvu-zivotního-prostředí-vodíkové-memorandum-Cílem-je-větší-mezikrajská-spolupráce-pro-rozvoj-vodíkových-technologií

[6] Komunální ekologie, „Vznikl Vodíkový Klastr“, 4. července 2022 <https://www.komunalniekologie.cz/info/vznikl-vodikovy-klastr>.

[7] „Současné projekty“, oficiální stránka Dopravního podniku Ostrava, <https://www.dpo.cz/o-spolecnosti/dotace/soucasne-projekty.html>.

[8] Enviweb, „Teplárny Veolie Energie ve Frýdku-Místku a Krnově budou vyrábět i vodík“, 2. prosince 2021, <https://www.enviweb.cz/120697>.

[9] Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky, *Vodíková strategie České republiky*, 2021, https://www.hytep.cz/images/dokumenty-ke-stazeni/Vodikova-strategie_CZ_G_2021-26-07.pdf.

[10] Egú Brno, *Oponentní posudek k vybraným tématům z návrhu Národního Klimaticko-Energetického Plánu (NKEP) pro oblast FVE*, https://www.solarniasociace.cz/aktuality/20190107_oponentni-posudek-k-nkep-pro-fve.pdf.

[11] Obnovitelné zdroje vyrábí elektrickou energii téměř celoročně, ale jen menšinu času z roku vyrábí na plný instalovaný výkon.

[12] Cristobal Gallego-Castillo, Miguel Luis Heleno a Marta Victoria, „Self-consumption for energy communities in Spain: A regional analysis under the new legal framework“, *Energy Policy*, 2021, https://www.researchgate.net/figure/Capacity-factors-representative-for-every-region-in-Spain-Average-values-over-the-39_fig2_349072887.

obnovitelného vodíku. Podobně je na tom v České republice i využití větrných elektráren, a to například s v porovnání s offshorovými elektrárnami stavěnými v Severním moři, které mohou vyrábět obnovitelnou elektřinu, potažmo v napojení na elektrolyzátor také obnovitelný vodík, za výrazně nižší cenu kvůli tomu, že vyrobí výrazně více elektrické energie ročně na jednotku instalovaného výkonu. České republice se navíc dlouhodobě nedaří efektivně nové větrné elektrárny stavět. Postavit v podmínkách ČR jednu větrnou elektrárnu může trvat i déle než 10 let^[13].

Vodíková strategie České republiky právě z výše zmíněných důvodů přikládá význam i jiným výrobám vodíku, jmenovitě například výrobě elektrolyzátorem vody za použití jaderných zdrojů energie. Právě tento typ výroby legislativně docílí výroby nízkouhlíkového vodíku. Je, ale nutné zmínit, že obnovitelný vodík má v unijní legislativě výrazně lepší postavení než vodík nízkouhlíkový, a to z toho důvodu, že pouze obnovitelným vodíkem lze plnit sektorové cíle směrnice o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů v průmyslu a dopravě, zatímco nízkouhlíkový vodík plní pouze povinné cíle snižování emisí skleníkových plynů v dopravě.

Nezávisle na legislativně stanovených cílech na úrovni unijních institucí, řada společností v České republice již příležitost, kterou představuje vodíkové hospodářství, identifikovala. To se zrcadlí například v prudkém nárůstu počtu členů *České vodíkové technologické platformy*, jež se během uplynulých dvou let rozrostla z méně než 30 na více jak 80 členů, kteří se specializují na většinu oblastí vodíkového hodnotového řetězce. Česká republika je například tradičně silná v technologiích na skladování vodíku zejména v plynné formě o různých tlacích. Konkrétně lze zmínit například společnost Cylinders Holding, Východočeské plynárenské strojírný, Hydrogen Systems, Strojón, Rév Group a další. V oblasti dodávek technických plynů (i zkapalněných) na českém území působí společnosti Linde Gas, Air Products, Chart Ferox nebo Messer Technogas. Z hlediska koncových produktů vodíkových technologií, jakými jsou palivové články, nebo malé elektrolyzátory či testovací sady je také nutné zmínit společnosti jakými jsou DEVINN, LeanCat, nebo Kolibrik.net. V oblasti vodíkové mobility na českém trhu působí a vyvíjí vodíkové městské autobusy například společnost Škoda Electric. Ve Vysokém mýtě zase v budoucnu předpokládá postavit výrobní závod na výrobu meziměstských vodíkových autobusů společnost Iveco Bus. V oblasti železniční mobility lze na českém trhu nalézt společnosti zabývající se přestavbou starých dieselových lokomotiv na vodíkový pohon, jakými jsou například firmy CZ Loko nebo průmyslová skupina Thein Industry. Kromě oblasti železniční dopravy se řada menších i větších českých firem také zaměřuje na vývoj prototypů využívající palivové články. Například společnost Zebra Group počítá s vodíkem u vozidel komunálních služeb, česká společnost Tatra Trucks zase vyvíjí prototyp nákladního vozidla využívaného v těžkých podmínkách lomů na přepravu vytěženého materiálu.

V neposlední řadě se v České republice pomalu začínají rozbíhat projekty, které počítají s výrobou a následným využitím zejména obnovitelného vodíku. Nejdále je s výstavbou elektrolyzátoru společnost Solar Global, která již testuje 230 kW elektrolyzátor, jež bude napojený na fotovoltaickou elektrárnu ve zlínských Napajedlech a vyrábět vodík v ostrém provozu by měl začít na podzim 2023. Ve fázi realizace a získávání potřebných povolení jsou ale již další společnosti, které plánují do budoucna instalovat elektrolyzátory o celkových výkonech v jednotkách až desítkách MW. Mezi tyto společnosti patří Veolia, Teplárny Brno, Orlen Unipetrol, FOR H2ENERGY, ČEZ, Sev.en Energy, C-Energy planá, nebo distribuční společnost GasNet. Všechny tyto projekty jsou většinou spjaty s lokálním využitím vodíku poblíž místa výroby. Etablování plnohodnotného trhu s vodíkem bude postupné a skutečně masivní využití vodíku nastane až v 30. letech 21. století, kdy by měly začít fungovat první dedikované plynovody přepravující čistý vodík^[14].

Řada společností nicméně už dnes naráží na limity české i evropské legislativy, které realizaci pilotních projektů přibrzdí. Protože je Česká republika součástí vnitřního trhu a plnohodnotným partnerem v rámci Evropské unie, i zde bude možné nasazení vodíkových technologií buďto podpořeno nebo přibrzděno v závislosti na výsledku jednání mezi členskými státy, Evropskou komisí a Evropským parlamentem. Přestože Evropská unie neustále aktualizuje své plány v otázce rozvoje celoevropského vodíkového hospodářství, a to i v souvislosti s geopolitickým děním na východ

[13] EkoneWS, „Proč se nestaví větrné elektrárny? Stavbu komplikují složité schvalovací procesy i obavy z hluku“, 21. června 2022, <https://www.ekoneWS.cz/proc-se-nestavi-vetrne-elektrarny-stavbu-komplikuji-slozite-schvalovaci-procesy-i-obavy-z-hluku/>.

[14] European Hydrogen Backbone, *European Hydrogen Backbone A European Hydrogen Infrastructure Vision Covering 28 Countries*, <https://ehb.eu/files/downloads/ehb-report-220428-17h00-interactive-1.pdf>.

od členských států EU, strategie a plány nejsou vždy podpořeny adekvátními legislativními návrhy. Nově například Evropská komise v plánu *REPowerEU* počítá s výrobou až 10 milionů tun obnovitelného vodíku do roku 2030, stejné množství vodíku by mělo být do Evropy dováženo, patrně formou derivátů, jakými je obnovitelný metanol, amoniak, LOHC^[15], nebo ve formě zkapalněného vodíku^[16]. Zda tento plán v zamýšleném rozsahu bude uskutečněn nelze v tuto chvíli s jistotou predikovat.

[15] Liquid Organic Hydrogen Carrier, jedná se o tekuté organické nosiče vodíku, které se podobají vzhledem i konzistencí ropným produktům.

[16] Evropská komise, *RePowerEU* (2022), https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:fc930f14-d7ae-11ec-a95f-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF.

4. Technologická a komerční připravenost vybraných klíčových technologií v kontextu rozvoje vodíkového hospodářství

Spektrum technologií, které by bylo nutné v kontextu rozvoje vodíkového hospodářství v České republice popsat je rozsáhlé. Jedná se zejména o:

- technologie zajišťující výrobu obnovitelného a nízkouhlíkového vodíku;
- technologie sloužící ke skladování vodíku a přepravě vodíku;
- technologie zajišťující využití vodíku jako paliva.

K prioritizaci vybraných klíčových technologií, které budou podrobněji popsány v této kapitole je použit současný návrh legislativního rámce vznikající na unijní úrovni s názvem *Net Zero Industry Act (NZIA)*^[17]. Tento návrh má cíl identifikovat pro Evropskou unii strategické technologie sloužící k dekarbonizaci hospodářství a podpořit jejich nasazení v praxi zjednodušeným legislativním prostředím, investičními pobídkami a podporou výstavby továren vyrábějící tyto technologie na území Evropské unie. Mezi klíčové technologie řadí NZIA solární fotovoltaické a solární termální technologie, větrnou energii na pevnině a obnovitelné zdroje na moři, baterie a skladování energie, tepelná čerpadla a geotermální energie, elektrolyzéry a palivové články, bioplyn a biometan, technologie na zachycování a ukládání uhlíku a technologie zajišťující správný chod elektrizační soustavy. V souvislosti s výše zmíněným návrhem nařízení je nutné zmínit, že spektrum podporovaných a relevantních technologií v České republice je do značné míry omezeno politikou Evropské unie zaměřující se primárně na technologie využívající obnovitelné zdroje energie. I z toho důvodu jsou například dlouhodobě z politických důvodů upozadovány jaderné technologie a další nízkouhlíkové technologie, které jsou z hlediska snižování emisí skleníkových plynů relevantní, avšak politicky problematické. Tato kapitola vychází ze souhrnných strategických a výzkumných dokumentů Evropské komise, Mezinárodní agentury pro energii, organizace Clean Hydrogen Partnership, nezávislých akademických studií a dalších relevantních zdrojů mapující technologickou a komerční připravenost vybraných technologií, včetně jejich potenciálu nasazení v posledních letech.

Metodologie definující technologickou připravenost jednotlivých technologií je přejata ze studie *Technical assistance to assess the potential of renewable liquid and gaseous transport fuels of non-biological origin (RFNBOs) as well as recycled carbon fuels (RCFs)* zpracované pro Evropskou komisi konsorciem společností Guidehouse, Energy Systems Analysis Associates, Karlsruhe Institut für Technologie a Fraunhofer Institutem zveřejněným v únoru 2023^[18].

4.1 Technologie zajišťující výrobu obnovitelného a nízkouhlíkového vodíku

Záměrem této kapitoly je popsat technologickou i komerční připravenost technologií, které jsou potenciálně vhodné pro výrobu obnovitelného i nízkouhlíkového vodíku v České republice. Jednotlivé technologie výroby jsou níže rozřazeny podle jejich legislativní podpory v rámci unijní legislativy.

[17] Evropská komise, *Návrh nařízení Evropského parlamentu a Rady, kterým se zřizuje rámec opatření pro posílení evropského ekosystému výroby produktů technologií pro nulové čisté emise (Net Zero Industry Act – Akt o průmyslu pro nulové čisté emise)*, https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/net-zero-industry-act_en.

[18] Evropská komise, *Technical assistance to assess the potential of renewable liquid and gaseous transport fuels of non-biological origin (RFNBOs) as well as recycled carbon fuels (RCFs)*, https://energy.ec.europa.eu/publications/technical-assistance-assess-potential-renewable-liquid-and-gaseous-transport-fuels-non-biological_en

4.1.1 Obnovitelný vodík (elektrolýza)

Nejpodporovanějším typem výroby obnovitelného vodíku napříč regulačním prostředím Evropské unie je výroba vodíku prostřednictvím elektrolýzy vody. Nejočekávanějším rozšířením výroby vodíku do budoucna je konkrétně technologie výroby vodíku pomocí elektrolýzy vody. Elektrolýza vody je technologie intenzivně využívaná již od počátku 20. století, kdy společnost Norsk Hydro instalovala elektrolyzéry vyrábějící vodík pro výrobu amoniaku^[19]. V principu se jedná o proces, při kterém je využívána elektrina k elektrochemickému rozkladu molekul vody na vodík a kyslík. Elektrolyzéry jsou komplexní zařízení sestávající kromě samotného svazku i z řady dalších komponentů, které lze souhrnně označit pod pojmem podpůrného systému elektrolyzéry (BOP). Každá jednotlivá část systému elektrolyzéry má do budoucna odlišný potenciál ke snížení ceny v návaznosti na její dosud proběhlou či teprve očekávanou sériovou výrobu.

Elektrolytické technologie se dělí na nízkoteplotní a vysokoteplotní. Mezi nízkoteplotní elektrolyzéry se řadí alkalické elektrolyzéry (AEL), elektrolyzéry s protonově vodivou membránou (PEMEL) a elektrolyzéry s anion selektivní membránou (AEMEL). Mezi vysokoteplotní elektrolyzéry spadá technologie elektrolýzy s elektrolytem na bázi pevných oxidů (SOEL). Jednotlivé technologie se nachází v různých stavech technologické vyspělosti, přičemž jejich vhodnost využití předurčuje režim provozu, ve kterém je vhodné tyto technologie využívat. Zatímco PEM elektrolyzéry jsou vhodné pro výrobu vodíku v návaznosti na intermitentní obnovitelné zdroje, vysokoteplotní elektrolyzéry jsou vhodnější pro využití v kombinaci se stabilním zdrojem elektriny a tepla. K roku 2023 jsou technologicky i komerčně nejvyspělejší technologií elektrolýzy technologie alkalické elektrolýzy vody a elektrolýzy vody využívající protonově vodivou membránu.^[20] Výrobní kapacity elektrolyzérů na území Evropské unie v roce 2023 činily podle *European Clean Hydrogen Alliance*^[21] přibližně 3,1 GW elektrolyzérů ročně^[22]. Podle IEA se Evropa na celosvětovém trhu s elektrolyzéry podílí přibližně z 30 %^[23]. Evropská výroba elektrolyzérů plánují do roku 2025 navýšit výrobní kapacity na 21 GW.

Alkalická elektrolýza vody

Alkalická elektrolýza (AEL) je nejstarším a technologicky nejvyspělejší typem technologie elektrolytické výroby vodíku, která byla poprvé využita před více jak 120 lety^[24]. Již v roce 1902 bylo ve světě provozováno na 400 průmyslových alkalických elektrolyzérů^[25]. Podle reportu technologické asistence v kontextu výroby obnovitelných paliv nebiologického původu se k datu vydání této cestovní mapy alkalická elektrolýza pohybuje na technologické úrovni (TRL) 7–9, přičemž úroveň komerčního nasazení mezi 2–3 (*obrázek 1*). Značnou výhodou alkalických elektrolyzérů je jejich životnost ověřená dlouhodobým provozem, která se pohybuje v případě samotného svazku na úrovni okolo 60 tisíc hodin a nižší pořizovací cena vycházející z absence drahých materiálů (kovů) na katalyzátorech, jakými je například iridium a platina v porovnání s PEM elektrolyzéry. Elektrická účinnost celého systému zahrnující předúpravu vody, elektrolytický svazek (elektrolyzér), výkonovou a řídicí elektroniku, podpůrný systém elektrolyzéry a subsystém

[19] NelHydrogen, Electrolysis: a Norwegian success story, <https://nelhydrogen.com/podcasts/electrolysis-a-norwegian-success-story/>

[20] Clean Hydrogen Partnership, *Programme review report 2022*, prosinec 2022, 24–25, https://www.clean-hydrogen.europa.eu/system/files/2022-12/Programme%20Review%20Report%202022_1.pdf

[21] Evropská aliance pro čistý vodík sdružuje zástupce unijních institucí, soukromých společností, výzkumných asociací, neziskových organizací apod. Aliance byla založena v červenci 2020 a jejím cílem je rozvoj technologií produkujících a využívajících čistý vodík v Evropské unii. https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy/industrial-alliances/european-clean-hydrogen-alliance_en

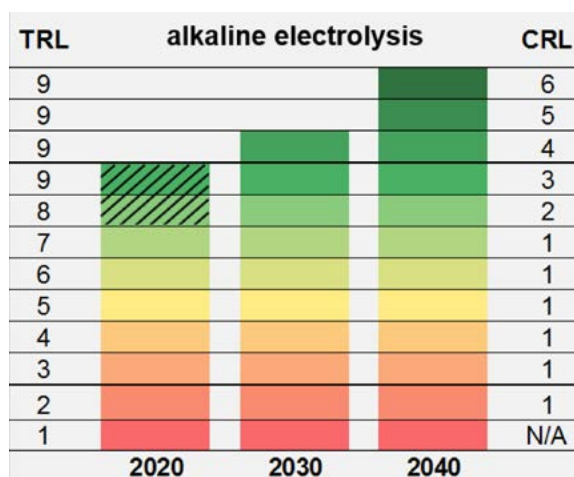
[22] European Clean Hydrogen Alliance, *Second European Electrolyser Summit State of play on the Joint Declaration*, 26. června 2023 <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/54935>

[23] Mezinárodní agentura pro energii, *Energy Technology Perspectives 2023*, leden 2023, 246–248, <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>

[24] Fraunhofer Institute, *Cost Forecast for Low Temperature Electrolysis – Technology Driven Bottom-up Prognosis for PEM and Alkaline Water Electrolysis Systems*, 2021, 17–23, <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/cost-forecast-for-low-temperature-electrolysis.pdf>

[25] W. Kreuter a H. Hoffman, „Electrolysis: The important energy transformer in a world of sustainable energy“, *International Journal of Hydrogen Energy*, srpen 1998, 661, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319997001092>

dočištění vodíku se základní kompresí se pohybuje od 50 až po 70 % v závislosti na režimu provozu.^[26] Nevýhodou je relativně dlouhá doba náběhu celého systému v případě studeného startu, který trvá standardně méně jak 50 minut, vyšší prostorová náročnost celého systému a minimální výkon, při kterém elektrolyzátor ještě může pracovat, který v roce 2022 činil dle dostupných dat od výrobců více než 15 % z maximálního výkonu. Alkalické elektrolyzátory jsou obecně méně flexibilní v porovnání s PEM elektrolyzátory. Výhledově lze očekávat k roku 2050 snížení investiční ceny elektrolyzátoru o více jak 80 % a navýšení účinnosti celého systému zejména vlivem zvětšení nominálního výkonu elektrolytických svazků a výstupního tlaku v jednom zařízení a zvýšení životnosti svazku na až 120 000 hodin.



Obrázek 1: Studie Technical assistance to assess the potential of renewable liquid and gaseous transport fuels of non-biological origin (RFNBOs) as well as recycled carbon fuels (RCFs)

PEM elektrolýza vody

Elektrolyzátor využívající pevný elektrolyt s protonově vodivou membránou (PEMEL) je k datu publikace tohoto dokumentu druhým technologicky nejvyspělejším řešením nízkoteplotní elektrolýzy vody. Podle reportu technologické asistence v kontextu výroby obnovitelných paliv nebiologického původu se k datu vydání této cestovní mapy technologická vyspělost PEM elektrolyzátorů pohybuje na technologické úrovni od 7–8, přičemž její úroveň komerčního nasazení se pohybuje mezi 1–2 (obrázek 2). Výhodou PEMEL systémů je možnost jejich výkon snížit až na 5 % nominálního výkonu a jejich značná flexibilita, která umožňuje těmto systémům pracovat ve výkonu od 5 až po 130 %^[27]. V případě studeného startu je dosaženo vhodných provozních teplot standardně do 20 minut, někteří výrobci však dokonce tvrdí i do 5 minut^[28]. To z této technologie dělá relativně vhodný nástroj k využívání při vyrovnávání elektrizační soustavy a v kombinaci s variabilními obnovitelnými zdroji energie. Životnost elektrolyzátorů se pohybuje v rozmezí od 50 000 až po 80 000 hodin, přičemž celková elektrická účinnost systému je přibližně podobná alkalickým elektrolyzátorům, tedy od 50 až po 70 %, obecně ale literatura PEM elektrolýzu popisuje jako nejúčinnější elektrolýzu vody. Další výhodou je výroba vodíku o vysoké čistotě, zpravidla přímo vhodné pro palivové články. Výhledově lze očekávat k roku 2050 snížení investiční ceny elektrolyzátoru o více jak 80 % a navýšení účinnosti celého systému zejména vlivem zvětšení nominálního výkonu elektrolytických svazků a výstupního tlaku v jednom zařízení a zvýšení životnosti svazku na 100 až 120 000 hodin. Snižování ceny nicméně bude výrazně záležet na technologickém vývoji a použití nových materiálů, a to z důvodu vysoké ceny ušlechtilých kovů, zejména iridia a platiny bez kterých se momentálně

[26] Marian Chatenet, Bruno G. Pollet, Dario R. Dekel, Fabio Dionigi a další, „Water electrolysis: from textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments“, Chemical Society Review, květen 2022, 4603–4604, https://www.researchgate.net/publication/360636563_Water_electrolysis_from_textbook_knowledge_to_the_latest_scientific_strategies_and_industrial_developments

[27] Ibid., 4603-4604

[28] Hydrogen Insight, Green Hydrogen: Which type of electrolyser should you use, 5. července 2023, <https://www.hydrogeninsight.com/electrolysers/green-hydrogen-which-type-of-electrolyser-should-you-use-alkaline-pem-solid-oxide-or-the-latest-tech-/2-1-1480577>

katalyzátory PEM elektrolyzérů neobejdou. Při dodržení současných technologických postupů použití iridia na katalyzátory by si 100 MW PEM elektrolyzér vyžádal přibližně 50 kg iridia (přibližně 2 mg iridia na cm² katalyzátoru při zachování výkonu 4 W na cm²). Cena 50 kg iridia bez zpracování v roce 2022 odpovídala přibližně 10 milionům amerických dolarů, přičemž produkce iridia v roce 2022 byla na úrovni 7-8 tun ročně^[29]. Tento faktor bude v budoucnu hrát signifikantní roli při navyšování výroby PEMEL, přičemž současné výzkumné aktivity se zaměřují z velké části právě na snížení množství požadovaného iridia a platiny.

TRL	polymer electrolyte membrane electrolysis			CRL
9				6
9				5
9				4
9				3
8	■	■	■	2
7	■	■	■	1
6	■	■	■	1
5	■	■	■	1
4	■	■	■	1
3	■	■	■	1
2	■	■	■	1
1	■	■	■	N/A
	2020	2030	2040	

Obrázek 2: Studie Technical assistance to assess the potential of renewable liquid and gaseous transport fuels of non-biological origin (RFNBOs) as well as recycled carbon fuels (RCFs)

AEM elektrolýza vody

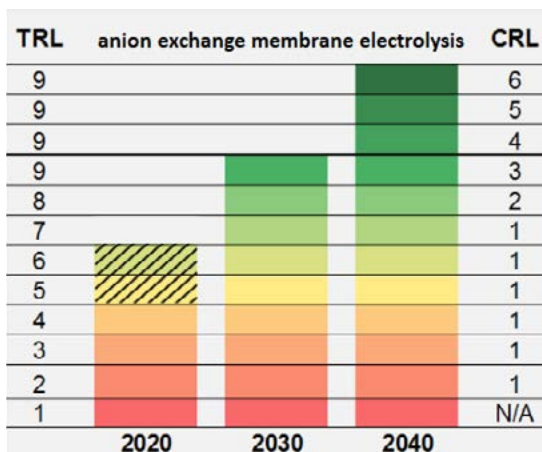
Slibnou technologií kombinující řady výhod PEMEL a alkalických elektrolyzérů je technologie elektrolýzy vody s aniontově selektivní membránou (AEMEL). Report technologické asistence využitý pro zhodnocení technologické připravenosti bohužel není v případě AEM elektrolyzérů k dispozici. Pro referenci a zhodnocení bude využit report IEA, který v září 2022 zhodnotil technologickou připravenost na úrovni 6^[30]. Dle současné literatury a v kontextu dalších technologií lze zhodnotit komerční připravenost AEM elektrolýzy na úrovni 1. V současnosti se rozvojem a komercializací této technologie zabývají dvě společnosti, konkrétně společnost Enapter a společnost Alchemr, přičemž společnost Enapter počítá s výrobou až 1 MW elektrolyzérů v Německu od roku 2023 s roční plánovou kapacitou až 300 MW^[31]. Výhodou AEM elektrolýzy je podobně jako v případě PEM elektrolýzy vyšší míra flexibility v kombinaci s variabilními zdroji energie, možnost rychlého studeného startu a funkčnost již při 5 % nominálním výkonu. Další výhodou je kompaktnost zařízení podobně jako v případě PEM elektrolyzérů. Značnou výhodou je také absence vzácných kovů v katalyzátorech, jakými jsou platina a iridium, a tedy i potenciálně výrazně nižší investiční náročnost celého řešení. Značnou nevýhodou je prozatím velmi nízká životnost svazků, která v roce 2022 zpravidla nepřesahovala 5000 hodin. Účinnost celého systému je pak podobná PEM elektrolyzérům a pohybuje se od 50 do 70 %^[32]. Cena AEM elektrolyzérů by měla klesat k roku 2050 podobně jako v případě alkalických elektrolyzérů.

[29] Marian Chatenet, Bruno G. Pollet, Dario R. Dekel, Fabio Dionigi a další, „Water electrolysis: from textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments“, Chemical Society Review, květen 2022, 4668–4678, https://www.researchgate.net/publication/360636563_Water_electrolysis_from_textbook_knowledge_to_the_latest_scientific_strategies_and_industrial_developments.

[30] Mezinárodní agentura pro energii, *Electrolysers*, <https://www.iea.org/reports/electrolysers>

[31] Enapter, *Enapter AG unveils the world's first megawatt-class AEM electrolyser*, 23. května 2023, <https://www.enapter.com/newsroom/enapter-ag-unveils-the-worlds-first-megawatt-class-aem-electrolyser>

[32] Marian Chatenet, Bruno G. Pollet, Dario R. Dekel, Fabio Dionigi a další, „Water electrolysis: from textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments“, Chemical Society Review, květen 2022, 4603–4604, https://www.researchgate.net/publication/360636563_Water_electrolysis_from_textbook_knowledge_to_the_latest_scientific_strategies_and_industrial_developments



Obrázek 3: Vlastní odhad na základě informací od Mezinárodní agentury pro energii, přizpůsobený předchozím grafům ze studie *Technical assistance to assess the potential of renewable liquid and gaseous transport fuels of non-biological origin (RFNBOs) as well as recycled carbon fuels (RCFs)*

Elektrolýza vody s elektrolytem na bázi pevných oxidů

Vysokoteplotní elektrolýza (SOEL) provozována standardně mezi 800 až 1 000 °C má oproti nízkoteplotní elektrolýze řadu provozních výhod, zejména pak vyšší elektrickou účinnost celého systému, která se u testovaných prototypů při využití odpadního tepla systémově dokáže vyšplhat až na 84 %^[33]. Podle reportu technologické asistence v kontextu výroby obnovitelných paliv nebiologického původu se k datu publikace této cestovní mapy technologická úroveň SOEL pohybuje okolo úrovně 7, přičemž komerční připravenost je na úrovni 1. Jak už bylo uvedeno výše, jednou z největších výhod vysokoteplotní elektrolýzy je vyšší elektrická účinnost při využití zdroje odpadního tepla. To z této technologie dělá adepta na vysokoúčinnou výrobu vodíku v kombinaci například s novými generacemi jaderných elektráren, nebo centralizované výroby v průmyslových oblastech, kde je k dispozici zdroj odpadního tepla. Vysokoteplotní elektrolýzery lze navíc výkonově provozovat v rozmezí od 30 do 125 %. Významnou výhodou této technologie je její schopnost fungovat jednak jako elektrolýzer, tak jako potenciální palivový článek v reverzním režimu. Značnou nevýhodou je nízká flexibilita, kdy vysokoteplotní elektrolýzery nejsou vhodné pro rychlé a studené starty v kombinaci s variabilními zdroji obnovitelné energie. Standardně tak může trvat až 600 minut po studeném startu, než je dosaženo vhodné provozní teploty (provozovat takto SOEL se nicméně nedoporučuje kvůli namáhání materiálů a jejich opotřebení)^[34]. Další nevýhodou je relativní technologická nevypěstlost zařízení, kdy životnost svazku dosahuje zpravidla méně jak 20 000 hodin. Právě vysoká teplota představuje zvýšené nároky na materiály, které jsou u vysokoteplotní elektrolýzy používány.

[33] Sunfire, *Renewable Hydrogen For Industrial Applications, Sunfire-Hylink SOEC*, <https://www.sunfire.de/files/sunfire/images/content/Sunfire.de%20%28neu%29/Sunfire-Factsheet-HyLink-SOEC-20210303.pdf>

[34] Marian Chatenet, Bruno G. Pollet, Dario R. Dekel, Fabio Dionigi a další, „*Water electrolysis: from textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments*“, *Chemical Society Review*, květen 2022, 4603–4604, https://www.researchgate.net/publication/360636563_Water_electrolysis_from_textbook_knowledge_to_the_latest_scientific_strategies_and_industrial_developments

TRL	solide oxide electrolysis			CRL
9				6
9				5
9				4
9				3
8				2
7				1
6				1
5				1
4				1
3				1
2				1
1				N/A
	2020	2030	2040	

Obrázek 4: Studie Technical assistance to assess the potential of renewable liquid and gaseous transport fuels of non-biological origin (RFNBOs) as well as recycled carbon fuels (RCFs)

4.1.2 Nízkouhlíkový vodík

Unijní legislativa kromě tzv. obnovitelného vodíku podporuje i nízkouhlíkový vodík. Nízkouhlíkový vodík je dle unijní definice vodík, který je vyroben z neobnovitelných zdrojů energie za předpokladu, že výroba 1 kg vodíku nevypustí do atmosféry více jak 3,38 kg CO₂. V praxi lze tedy k výrobě nízkouhlíkového vodíku využít fosilní paliva při předpokladu zachycení emisí oxidu uhličitého prostřednictvím technologie ukládání oxidu uhličitého (CCS – Carbon Capture and Storage), případně pomocí technologie zachycení a využití oxidu uhličitého (CCU – Carbon Capture and Utilisation). Řada konceptů a výrobních postupů nízkouhlíkového vodíku dnes počítá primárně s využitím zemního plynu s následným zachycováním oxidu uhličitého, ať už pomocí parního či autotermálního reformingu zemního plynu. Alternativně v České republice lze uvažovat nad zachycováním oxidu uhličitého v rafinerii v Litvínově, která využívá technologii parciální oxidace ropných zbytků pro výrobu vodíku. Potenciálně zajímavou technologií do budoucna se jeví technologie pyrolýzy zemního plynu, při níž nevzniká žádný oxid uhličitý, ale pouze pevný uhlík. Dle pravidel unijní legislativy lze jako alternativní způsob výroby nízkouhlíkového vodíku také označit výrobu prostřednictvím elektrolýzy za použití nízkouhlíkového zdroje elektřiny. To v Evropské unii i České republice nejlépe splňují jaderné elektrárny. Technologický postup se, ale neliší od elektrolýzy vody (viz předchozí kapitola) a z toho důvodu, tak nebude dále rozpracován v této kapitole.

Parní reforming zemního plynu

V době publikace této cestovní mapy byl parní reforming zemního plynu (metanu) nejčastěji využívanou metodou výroby vodíku na světě^[35]. Technologie funguje v několika krocích. Nejprve je nutné metan odsířit a následně jej poslat do zařízení, ve kterém za vysoké teploty, při přibližně 700–850 °C, tlaku 35 bar za přítomnosti katalyzátoru na bázi niklu a za přítomnosti vodní páry dochází k chemické reakci, při které vzniká vodík a oxid uhelnatý^[36]. Teplo pro

[35] Mezinárodní agentura pro energii, *Global Hydrogen Review 2022*, <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022/executive-summary>.

[36] Osama Massarweh, Maha Al-khusaei, Manal Al-Shafi a další, „Blue hydrogen production from natural gas reservoirs: A review of application and feasibility“, *Journal of CO2 Utilisation*, duben 2023, 5-7, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212982023000495>

požadovanou reakci je do procesu dodáváno standardně spalováním části zemního plynu. Při navazujících chemických reakcích s vodní párou a za nižších teplot je následně oxid uhelnatý převeden na oxid uhličitý, který je po separaci vodíku standardně vypouštěn do atmosféry. Vodík může být následně v zařízení dočištěn na požadovanou kvalitu. Přibližně 30–40 % použitého zemního plynu je při procesu spáleno pro pohon celého procesu, přičemž ze zbytku je vyráběn vodík^[37]. Účinnost celého procesu výroby vodíku se pohybuje standardně v rozmezí 76–77 %^[38]. Pokud by k zařízení využívající technologii parního reformingu zemního plynu byla přidána technologie zachycování oxidu uhličitého, množství spotřebovaného zemního plynu pro pohon samotného zachycování vzroste jen marginálně^[39]. Při navazujícím dočištění vodíku je nutné brát v úvahu postupné snižování účinnosti celého procesu v návaznosti na vyšší spotřebu energie. Technologie parního reformování zemního plynu je celosvětově etablovanou technologií s úrovní technologické a komerční vyspělosti ve všech směrech na nejvyšším stupni. Potenciálním způsobem, jak snížit emise skleníkových plynů z výroby vodíku, je využít místo standardního zemního plynu biometan. Nejvyšší účinnosti dosahují velkokapacitní výroby. Parní reforming je dnes dodáván i v kontejnerizované podobě pro lokální výrobu vodíku v místě spotřeby^[40].

Autotermální reforming zemního plynu

V době publikace této cestovní mapy byl autotermální reforming méně používanou technologií v porovnání s tradičnějším parním reformováním zemního plynu, přičemž technologie není plně komercializovaná, a tak je vhodné ji zařadit na úroveň 1 komerční připravenosti^[41]. Hlavní rozdíl mezi oběma technologiemi je především vyšší teplota provozu 950–1 100 °C a fakt, že požadované teplo pro správnou funkčnost procesu je dodáváno nikoliv externě, ale přímo z reforméru v zařízení. Autotermální reformování také na rozdíl od parního reformingu využívá čistý kyslík k optimální funkčnosti procesu. Veškerý oxid uhličitý odchází z procesu ve formě syntetického plynu, což výrazně zjednodušuje možnost zachytávání oxidu uhličitého. Očekává se, že autotermální reforming zemního plynu bude do budoucna patrně preferovaným typem technologie pro výrobu vodíku ze zemního plynu, a to zejména z důvodu větších úspor z rozsahu, kterých je možné u této technologie dosáhnout a jednoduššímu zachycování oxidu uhličitého v celém procesu výroby vodíku^[42]. Potenciálním způsobem, jak snížit emise skleníkových plynů z výroby vodíku je využít místo standardního zemního plynu biometan.

Parciální oxidace ropných zbytků (POX)

V době publikace této cestovní mapy byla parciální oxidace ropných zbytků nejrozšířenější výrobou vodíku na území České republiky. Jedná se o celosvětově 3. nejrozšířenější způsob výroby vodíku^[43]. Jako surovinu lze využít jak plynné, tak kapalné suroviny ze zpracování ropy^[44]. Nejčastěji, ale dochází ke zplyňování těžkých ropných frakcí, surovina se standardně zplyňuje kyslíkem a vodní parou při teplotách v rozmezí od 1 300–1 500 °C a tlacích 30–80 barů. Emisní náročnost výroby vodíku v rámci procesu POX je vyšší než v případě emisí vzniklých při výrobě vodíku z parního

[37] Mezinárodní agentura pro energii, *Opportunities for Hydrogen Production with CCUS in China*, listopad 2022, <https://www.iea.org/reports/opportunities-for-hydrogen-production-with-ccus-in-china>

[38] Christian Bauer, Karin Treyer, Cristina Antonini a další, „On the climate impacts of blue hydrogen production“, *Sustainable Energy & Fuels*, září 2021, 1-2, <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2022/se/d1se01508g>

[39] Mezinárodní agentura pro energii, *Global Hydrogen Review 2022*, <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022/executive-summary>

[40] HyGear, *The Global Hydrogen Source*, <https://hygear.com>

[41] Mezinárodní agentura pro energii, *Global Hydrogen Review 2022*, <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022/executive-summary>

[42] Christian Bauer, Karin Treyer, Cristina Antonini a další, „On the climate impacts of blue hydrogen production“, *Sustainable Energy & Fuels*, září 2021, 1-2, <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2022/se/d1se01508g>

[43] Mezinárodní agentura pro energii, *Global Hydrogen Review 2022*, <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022/executive-summary>

[44] Jiří Hájek, Tomáš Herink, „Potenciál využití vodíku v ČR“, *Paliva* 7, 16. listopadu 2015, 91-94, <http://paliva.vscht.cz/cz/archiv-clanku/detail/29>

reformingu zemního plynu^[45]. Podle Mezinárodní agentury pro energii lze i v případě parciální oxidace využít technologie zachytávání oxidu uhličitého. Takový pilotní projekt byl například v roce 2005 spuštěn v Nizozemsku v rámci rafinérie Pernis^[46].

Zachycování či využívání oxidu uhličitého (CCS/CCU)

Technologie zachycování oxidu uhličitého při výrobě vodíku ze zemního plynu je v době publikace této cestovní mapy relativně méně rozšířená. Z této skutečnosti tak lze usuzovat, že komerčního nasazení tohoto typu technologie zatím nebylo dosaženo, a tak je vhodné zařadit tyto technologie na úroveň komerční připravenosti 1. Podle IEA se na světě nachází přibližně 15 výroben vodíku, které zachycují oxid uhličitý, přičemž veškerý vodík je spotřebován v navazujících průmyslových procesech či pro navýšení zpracování ropy^[47]. Projekty na zachycování a ukládání oxidu uhličitého se nachází v Severní Americe, Francii či Japonsku. Výrobny, které byly uvedeny do provozu v minulých letech jsou obvykle schopné zachytit přibližně 50–60 % veškerých emisí oxidu uhličitého^[48]. Standardně totiž zachycují emise pouze ze syntetického plynu, který vzniká jako výsledek výrobních procesů, ale nezachycují emise, které vznikají při spalování zemního plynu k výrobě tepla. Jako příklad lze uvést projekt společnosti Shell s názvem *Quest Project*, který se nachází v Kanadě a využívá zachycený oxid uhličitý v navazujících procesech^[49]. Výrobna vodíku Quest průměrně v roce 2020 zachytila dle společnosti Shell asi 76,8 % oxidu uhličitého.^[50] Do budoucna se očekává navýšení zachycování emisí oxidu uhličitého na více jak 90 %^[51]. Výzvou z hlediska emisní náročnosti výroby vodíku při využití zachycení emisí skleníkových plynů zejména v kontextu využití zemního plynu je především otázka efektivity využívání zdrojů energie v celém procesu^[52]. Další výzvou pro rozvoj technologií masivního zachycování oxidu uhličitého jsou navazující investiční i provozní náklady vzniklé v případě přepravy oxidu uhličitého, monitorovací zařízení pro únik oxidu uhličitého a navazující zařízení v případě využívání samotného plynu v místě spotřeby či uskladnění skleníkového plynu^[53]. Lze předpokládat, že výsledná cena přepočtená na 1 kg vodíku se bude lišit v závislosti na konkrétním projektu, obecně je, ale cena vodíku v době vydání této cestovní mapy nižší než z elektrolytické výroby za předpokladu nízké ceny vstupních surovin, v tomto případě zemního plynu, tento rozdíl by se, ale měl v příštích dekádách narovnat.

Rozdíl v množství zachycování emisí oxidu uhličitého se liší v návaznosti na využitou technologii. V případě parního reformingu zemního plynu je možné v rámci celého procesu zachytit přibližně 85–90 % veškerých emisí oxidu uhličitého. Při využití autotermálního reformingu je potenciál zachycení vyšší než 90 %^[54].

[45] Ministerstvo průmyslu a obchodu, *Vodíková strategie České republiky*, 26. července 2021, <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/strategicke-projekty/vodikova-strategie-cr-schvalena-vladou--262590/>

[46] Webová stránka Digital Refining, Processing, Operations & Maintenance, *Decarbonising refining: key insights from Pernis refinery (ERTC)*, <https://www.digitalrefining.com/article/1002685/decarbonising-refining-key-insights-from-pernis-refinery-ertc>

[47] Mezinárodní agentura pro energii, *Global Hydrogen Review 2022*, <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022/executive-summary>

[48] Christian Bauer, Karin Treyer, Cristina Antonini a další, „On the climate impacts of blue hydrogen production“, *Sustainable Energy & Fuels*, září 2021, 1-4, <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2022/se/d1se01508g>

[49] Webová stránka společnosti Shell, *Quest Carbon Capture and Storage*, https://www.shell.ca/en_ca/about-us/projects-and-sites/quest-carbon-capture-and-storage-project.html

[50] Shell, *Quest CO2 Capture Ratio Performance*, 21. února 2021, <https://open.alberta.ca/dataset/d5694c02-019d-4650-8b09-3b5a9aff181/resource/0064427f-6d73-4042-bd8c-cdf9921d9204/download/quest-co2-capture-ratio-performance.pdf>

[51] HyNet North West, *HyNet Low Carbon Hydrogen Net*, listopad 2021, 27-29, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1056041/Phase_2_Report_-_Progressive_Energy_-_HyNet_Low_Carbon_Hydrogen__3_.pdf

[52] Osama Massarweh, Maha Al-khusaei, Manal Al-Shafi a další, „Blue hydrogen production from natural gas reservoirs: A review of application and feasibility“, *Journal of CO2 Utilisation*, duben 2023, 5-7, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212982023000495>

[53] *Ibid.*, 1-3.

[54] Minli Yu, Ke Wang, Harrie Vredenburg, „Insights into low-carbon hydrogen production methods: Green, blue and aqua hydrogen“, *International Journal of Hydrogen Energy*, 15. června 2021, 21268, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319921012684>

Pyrolýza metanu

Pyrolýza metanu je technologie, během níž dochází k termálnímu rozkladu metanu na vodík a pevný uhlík. Během procesu pyrolýzy metanu nedochází k uvolňování oxidu uhličitého. Přesto je ale nutné zmínit, že proces není uhlíkově neutrální, a to z důvodu využití elektrické energie k pohánění celého procesu a energie, která je spotřebována pro těžbu a přepravu zemního plynu k výrobně vodíku. Při použití elektřiny z obnovitelných zdrojů energie pro dosažení potřebné teploty může být emisní stopa vyrobeného vodíku výrazně snížena. Pyrolýza metanu nicméně v konečném důsledku vypustí do ovzduší výrazně menší množství oxidu uhličitého v porovnání s parním reformingem zemního plynu.^[55] Výhodou pyrolýzy je také fakt, že se jedná o jednostupňový proces. Celková účinnost pyrolýzy metanu se odhaduje na přibližně 58 %^[56]. Technologie pyrolýzy methanu nicméně není prozatím konkurenceschopná v porovnání s parním reformingem, přičemž výroba 1 tuny vodíku vyjde přibližně na 2 600 až 3 200 € v porovnání s 2000 € u parního reformingu^[57]. Největší technologickou výzvou rozvoje pyrolýzy metanu je nalezení takových katalyzátorů, které zvládnou bez problémů pokrýt většinu problémů s nečistotami nacházejících se v zemním plynu při zachování správné funkčnosti celého systému. Do budoucna je zároveň potenciálním zdrojem příjmu z pyrolýzy metanu i uhlík. Trh s pevným uhlíkem je, ale v době publikace této cestovní mapy saturován a žádné dlouhodobější predikce nenasvědčují jeho masovému rozšíření nad rámec současné spotřeby. Některé projekty na výrobu vodíku prostřednictvím pyrolýzy methanu jsou v době vydání této cestovní mapy v běhu. Například společnost BASF plánuje nasadit pyrolýzu methanu v industriálním měřítku přibližně v roce 2030^[58]. V praxi tak pyrolýza methanu není v době vydání této cestovní mapy na vyšší komerční úrovni nasazení než 1.

4.2 Technologie sloužící ke skladování a přepravě vodíku

Vodík je pro své fyzické vlastnosti, zejména nízkou energetickou hustotou na objem (3 kWh na 1 m³ za normálních podmínek), plynem, který je nutné v případě skladování a přepravy stlačit, zkapalnit, nebo přeměnit do formy derivátů (čpavek, methanol, LOHC apod.) pro zvýšení množství přepravované energie, což vyžaduje relativně velké množství energie^[59]. V době vydání této cestovní mapy je vodík primárně spotřebován v místě výroby, a to právě z výše zmíněného důvodu. Podobně jako v případě zemního plynu nejpozději v 30. letech lze očekávat postupný nástup přepravy vodíku, a to v Evropě primárně prostřednictvím plynovodů a dálkové přepravy derivátů vodíku, ať už ve formě uvažovaného čpavku, nebo methanolu. Tato kapitola se zaměří na skladování vodíku, přičemž hlavním záměrem je přiblížit současné způsoby skladování a přepravy vodíku a navazující technologie.

4.2.1 Stlačený plyný vodík (CGH₂)

Dnes se nejčastěji vodík v Evropě skladuje a přepravuje ve stlačené formě. Vodík je skladován při různých tlacích v závislosti na finálním využití. V případě využití vodíku v mobilitě je vodík uskladněn standardně při tlacích 350 nebo 700 bar, a to v kompozitních tlakových nádržích^[60]. Při skladování vodíku pro stacionární použití, nebo pro přepravu

[55] Nuria Sánchez-Bastardo, Robert Schlögl, Holger Ruland, „Methane Pyrolysis for Zero-Emission Hydrogen Production: A Potential Bridge Technology from Fossil Fuels to a Renewable and Sustainable Hydrogen Economy“, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, srpen 2021, b-e, https://www.researchgate.net/publication/353777823_Methane_Pyrolysis_for_Zero-Emission_Hydrogen_Production_A_Potential_Bridge_Technology_from_Fossil_Fuels_to_a_Renewable_and_Sustainable_Hydrogen_Economy

[56] Ibid., b-e

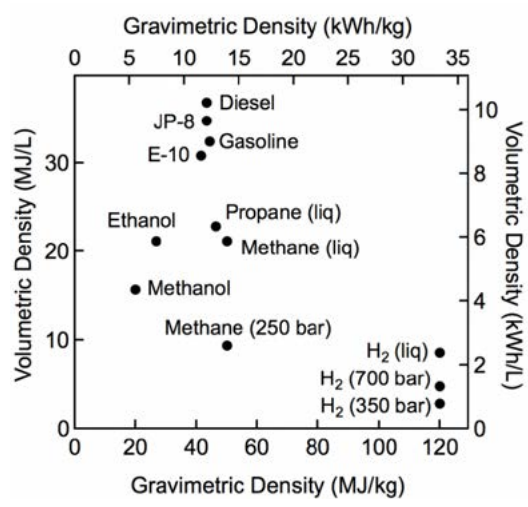
[57] Ibid., b-e

[58] Webová stránka společnosti BASF, *Clean hydrogen: Methane Pyrolysis*, <https://www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/we-produce-safely-and-efficiently/energy-and-climate-protection/carbon-management/innovations-for-a-climate-friendly-chemical-production.html#text-1002215085>

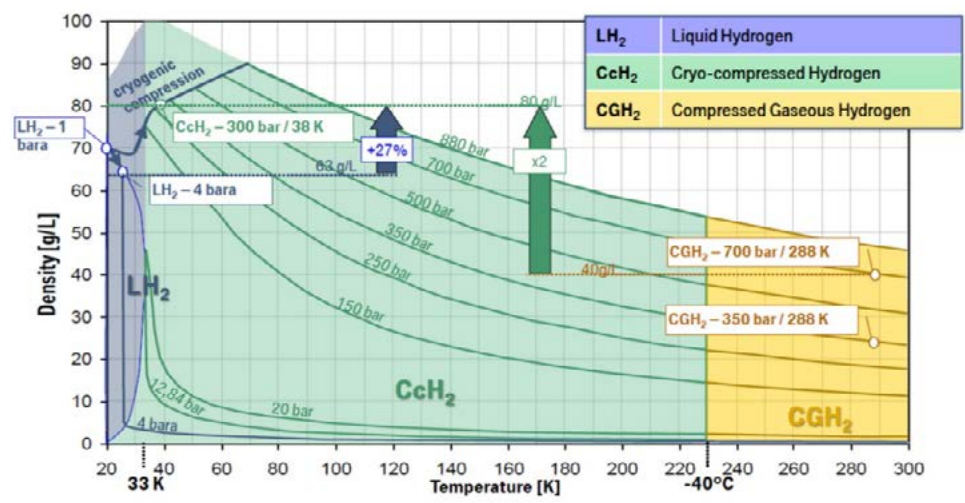
[59] Clean Hydrogen Joint Undertaking, *Study on hydrogen in ports and industrial coastal areas*, 30. března 2023, <https://www.clean-hydrogen.europa.eu/media/publications/study-hydrogen-ports-and-industrial-coastal-areas-en>

[60] S Orlova, N. Mezeckis, V. P. K. Vasudev, „Compression of Hydrogen Gas for Energy Storage: A Review“ *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 15. dubna 2023, 5–7, <https://sciendo.com/article/10.2478/lpts-2023-0007?tab=pdf-preview>

vodíku po silnici či železnici je využito standardně tlaku od 200 až do 500 barů, přičemž ke skladování i transportu se běžně využívají i ocelové nádrže^[61].



Obrázek 5: Porovnání energie (objemové i hmotnostní) s dalšími typy paliv na základě výhřevnosti, Department of Energy Spojených států amerických



Obrázek 6: Energetická hustota vodíku na objem v kontextu teploty, hustoty a tlaku, BMW

V případě skladování vodíku ve stlačené formě je nezbytné zmínit, že kromě samotných tlakových nádrží musí být pro stlačení vodíku využity kompresory. Nejčastěji používané technologie pro mechanickou kompresi vodíku jsou kompresory pístové, membránové či odstředivé. Relativně novou technologií jsou iontové kompresory neboli pístové kompresory pracující s iontovou kapalinou. Využití konkrétní technologie je vhodné na základě zvážení konkrétních potřeb, jakými jsou například rychlost komprese, míra stlačení, čistota vodíku při stlačení (kontaminace vodíku nečistotami) či nutnost údržby^[62].

[61] Evropská komise, *Assessment of hydrogen delivery options*, 21. října 2022, 10-12, <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC130442>

[62] Ibid., 10-11

4.2.2 Stacionární uskladnění vodíku

Pro stacionární uskladnění vodíku je možné využít buďto nadzemní skladovací zařízení, většinou vyrobené z ocelových či kompozitních materiálů, nebo alternativně využít pro uskladnění podzemní zásobníky, a to buďto ve formě solných jeskyní nebo vytěžených ložisek zemního plynu či vodních struktur. V případě uskladnění vodíku se souhrnně používají až 4 různé typy vodíkových nádrží^[63].

Nadzemní zásobníky mají značně nižší kapacitu uskladnění vodíku a tím i potenciálně nevhodné vlastnosti pro dlouhodobé skladování vodíku zejména pro energetické účely. Investiční náklady na uskladnění 1 kg vodíku se v případě nadzemních zásobníků pohybují v rozmezí od 850 do 2 000 €^[64]. Vodík je většinou ve stacionárních zásobnících ukládán při tlaku okolo 150 bar^[65]. Ve většině případů je pro ukládání vodíku do 150 barů využívána ocel. Nejpoužívanějším způsobem stacionárního skladování vodíku je jeho uložení v kulovitých či válcovitých nádržích. Alternativou je uskladnění vodíku v horizontálně či vertikálně položených ocelových lahvích. Vodík lze také skladovat v plynovodních systémech, které samy o sobě fungují jako akumulátory energie.

Při uskladnění vodíku v ocelových nádržích je nezbytné hledat takové materiály, které jsou certifikovány k použití s vodíkem, a to zejména v kontextu fenoménu vodíkového křehnutí a vodíkem indukovaného praskání.^[66] Vodíková křehkost je fenomén, jež se děje za normálních a nízkých teplot, kdy atomy vodíku mohou mít tendenci difundovat do povrchových vrstev materiálů a způsobovat trhliny^[67]. Náchylné na vodíkovou křehkost jsou především materiály o vyšších parametrech pevnosti, jakými jsou vysokopevnostní oceli, oceli s obsahem manganu, hliníkové slitiny či hořčíkové slitiny. Vodíkovou křehkost zpravidla způsobuje přítomnost vodíku nejčastěji u elektrochemického čištění, moření či při galvanickém pokovování. Ke křehnutí dochází při působení vyššího tlaku. Vodíkem indukované praskání se zpravidla děje při vyšší vlhkosti a ovlivňuje hlavně ocel a další slitiny o menší pevnosti. Vodík je absorbován do materiálů většinou ve slabším místě (například místa po svařování), kde následně vlivem zvýšeného napětí vznikají trhliny v materiálech^[68].

Stacionární uložení je vhodné rozdělit do několika kategorií, při atmosférickém tlaku do 150 barů je možné využít ke skladování válcovité stacionární uložení (*bullet tank*), které je hypotetické schopné při objemu 1 000 m³ uskladnit přibližně 15 tun vodíku. Nevýhodou tohoto řešení je velká prostorová náročnost a nutnost velmi silného pláště nádrží, což významně zvyšuje cenu celého řešení. Přesto se jedná o relativně vhodnou technologii pro uskladnění většího množství vodíku, přičemž toto řešení jsou schopné dnes dodávat i české společnosti koncovým zákazníkům, technologická i komerční připravenost tohoto řešení je tedy na velmi vysoké úrovni.

Druhým vhodným stacionárním uložení vodíku je využití podlouhlých ocelových lahvích, které jsou schopné skladovat vodík až při 300 barech. V současnosti se ocelové lahve používají pro přepravu vodíku a jde tedy již o zcela technologicky i komerčně vyspělé řešení. Společnosti, které dnes přepravu technických plynů zajišťují využívají pro přepravu vodíku právě toto řešení, standardně jsou schopní přepravit mezi 200–300 kilogramy vodíku. Na trhu v době vydání této cestovní mapy je možné najít i produkty, které jsou v ocelových lahvích schopné přepravovat a skladovat až 500 kilogramů vodíku^[69].

[63] HyFind, *What is hydrogen tank*, <https://hyfindr.com/hydrogen-tank/>

[64] United States Department of Energy Fuel Cell Technologies Office, *DOE Technical Targets for Hydrogen Delivery*, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-hydrogen-delivery>

[65] Olivier Ramber, Linda Febvre, „*The challenges of Hydrogen Storage on Large Scale*“, Engie Group, <https://hysafe.info/uploads/papers/2021/189.pdf>

[66] K určení materiálů vhodných pro skladování vodíku je vhodné nahlédnout do databáze ISO. Konkrétně ISO Technical Committee 197, <https://www.iso.org/committee/54560/x/catalogue/>

[67] F. C. Campbell, *Fatigue and Fracture: Understanding the Basics* (ASM International, 2012)

[68] The Piping Mart, *Hydrogen Induced Cracking (HIC): Process and Material*, 30. května 2022, <https://blog.thepipingmart.com/other/an-explanation-of-hydrogen-induced-cracking-hic/>

[69] Jedná se například o českou společnost Cylinders Holdings.

4.2.3 Uskladnění vodíku pro mobilní aplikace

Jednou z alternativ hojně využívaných v oblasti mobility, ale s možností využití i pro skladování vodíku ve stacionárních aplikacích jsou vodíkové nádrže vyrobené z kompozitních materiálů. Z hlediska pevnosti se jedná o typy skladovacích nádob, které se zpravidla využívají pro uskladnění vodíku při vyšších tlacích o 300 barech a výše^[70]. Při skladování vodíku v mobilních aplikacích se literatura věnuje celkem 4 typům uložení, které se liší především použitými materiály, a tedy svými vlastnostmi.

Typ 1 vodíkových nádrží – celý vyrobený z oceli či hliníku s relativně nízkými náklady a nejvíce rozšířený, zároveň s tím ale i nejtěžší.

Typ 2 vodíkových nádrží – vyrobený zpravidla z oceli a vyztužený kompozitními materiály v kulovitých místech, využívající vnitřní vložku většinou z hliníku k udržení vyšších tlaků^[71]. Typ 2 je přibližně o 50 % dražší jak typ 1 ale o 30–40 % lehčí^[72].

Typ 3 vodíkových nádrží – využívající ocelovou či hliníkovou vložku natolik zúženou, že již není ocel hlavním materiálem udržujícím vysoký tlak, nádrž je kompletně obalená v kompozitních materiálech, a to v uhlíkových či skleněných vláknech, typ 3 je přibližně o 50 % lehčí jak typ 2, ale stojí minimálně 2x tolik^[73]. Typ 3 je relativně rozšířeným zejména u větších vozidel (například autobusy) využívající nádrže na vodík o 350 barech.

Typ 4 vodíkových nádrží – využívající vložku z polymerů, nádrž je kompletně obalená uhlíkovými či skleněnými vlákny s epoxidovou pryskyřicí, přičemž tento typ nádrží je nejdražší a také nejlehčím typem ze všech výše zmíněných, který je schopný udržet vodík o vysokých tlacích, v osobních automobilech okolo 700 barů.

Pro mobilní aplikace je potenciálně i do budoucna nejzajímavější využívání nádrží typu 4. Podle analýzy *Department of Energy* (DOE) Spojených států amerických z června 2022 je cena systému na uskladnění vodíku o velikosti přibližně 60 kg a při 700 barech přibližně 349 € (přepočteno z USD do EUR) za uložený kilogram^[74]. Samotný DOE stanovuje cíl snížení investiční ceny na přibližně 273 € za uložený kilogram do roku 2030. Předpokladem pro postupné snižování ceny je snižování ceny uhlíkových vláken, která při použití systému o velikosti kapacity 60 kg a při 700 barech, jsou zodpovědná za přibližně 69 % ceny celého systému nádrží^[75].

Všechny 4 typy nádrží jsou v době tvorby této cestovní mapy dostupné komerčně, byť ne v masovém množství, a tak je jejich technologická úroveň na nejvyšší úrovni. Na trhu se nově začínají objevovat nádrže z kompozitních materiálů schopné uskladnit a přepravit i výrazně více kilogramů než při použití ocelových nádrží pro přepravu vodíku, většinou využívají výhody vyššího tlaku (okolo 500 bar) a nižší hmotnosti v porovnání s ocelovými nádržemi. Tyto jsou schopné přepravit či uskladnit například v 12metrovém kontejneru až 200 kilogramů vodíku^[76]. Jejich cena je ale výrazně vyšší než při použití standardních a léty využívaných technik pro přepravu a skladování vodíku v ocelových nádržích.

[70] HyFind, *What is hydrogen tank*, <https://hyfindr.com/hydrogen-tank/>

[71] Hyun Kyu Shin a Sung Kyu Ha, „A Review on the Cost Analysis of Hydrogen Gas Storage Tanks for Fuel Cell Vehicles“, *Energies*, 7. července 2023, <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/13/5233>

[72] *Ibid.*, 4-7

[73] *Ibid.*, 4-7

[74] United States Department of Energy, *2022 AMR Plenary Session on Hydrogen Program Update*, 6. června 2022, https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review22/plenary4_satyapal_2022_o.pdf

[75] Dokument vypracovaný DOE, *Hydrogen Storage Cost Analysis*, 7. června 2021, https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review21/st100_james_2021_o.pdf

[76] CompositesWorld – Delivering the Global Composites Market, *Carbon fibre in pressure vessels for hydrogen*, 7. listopadu 2022, <https://www.compositesworld.com/articles/cfrp-pressure-vessels-for-hydrogen>

4.2.4 Zkapalněný vodík (LH₂)

Vodík je možné skladovat i v kapalném stavu, a to za teplot okolo -253 °C při atmosférickém tlaku. Zkapalněný vodík má značnou výhodu především ve vyšší energetické hustotě na objem, která se v tomto případě přibližuje 71 g uloženého vodíku na 1 litr kryogenní nádrže v porovnání se stlačeným vodíkem, kde je možné při 700 barech uložit přibližně 40 g do 1 litru nádrže (viz obrázek 6)^[77]. Tato výhoda je značná zejména v případě distribuce vodíku, kde je možné na jednom traileru přepravit až 4 tuny vodíku (3,3 tun v EU)^[78]. Nádrže na zkapalněný vodík se standardně neplní do 100 %, ale přibližně 5–10 % celkového objemu zůstává uvolněno kvůli odpařování. Značnou nevýhodou je vysoká energetická náročnost zkapalňování, která v průmyslovém měřítku v současnosti spotřebuje od 15 do 43 MJ/1 kg vodíku, tedy více okolo 30 % energie obsažené v samotném vodíku^[79]. Trh se zkapalněným vodíkem je rozvinutý zejména ve Spojených státech amerických, a to z důvodu využití zkapalněného vodíku pro vesmírné mise NASA. Při signifikantním zvětšením kapacity zkapalňovače vodíku na až 50 tun denně a za pomoci dalších technologických zlepšeních je potenciálně do budoucna možné snížit spotřebu elektrické energie při zkapalňování až o 50 %.

Nádrže na skladování zkapalněného vodíku jsou obvykle dvojitě kryogenní nádrže, s vnitřní i vnější ocelovou stěnou, přičemž mezi vnitřní a vnější stěnou se nachází termálně izolační materiál. Značnou komplikací je odpařování vodíku, ke kterému dochází vlivem velmi nízké teploty varu ve zkapalněném stavu, to vytváří v nádržích tlak, který je nutné řešit ideálně přímo spotřebovat nebo ventilováním vodíku do ovzduší. Při zkapalňování vodíku a jeho stacionárním uskladnění je možné odpařený vodík zachytit a opět zkapalnit. Při přepravě vodíku po silnicích je standardní množství odparu vodíku odhadováno na okolo 1 % denně, ve stacionárních uložistích je odpařování denně menší a výzkumné aktivity se zaměřují na snížení odpařování na pod 0,1 % denně^[80]. K minimalizaci odparu vodíku je vhodné uvažovat nad použitím vhodných tvarů nádrží, kdy u kulovitých nádrží obvykle dochází k nejmenšímu množství odparu vodíku^[81]. Standardně k největším ztrátám dochází během zacházení se zkapalněným vodíkem mimo samotné nádrže.

Jedním z největších uložistí zkapalněného vodíku na světě je nově budovaná nádrž o objemu přibližně 4 734 m³ nacházející se v Kennedyho vesmírném středisku, která je používána pro uskladnění paliva v rámci vesmírných letů NASA. Cena za uskladnění 1 kilogramu vodíku ve zkapalněné formě se odhaduje na 150–300 € za 1 kg vodíku^[82].

V kontextu zkapalněného vodíku probíhá na světě řada výzkumných a vývojových projektů, které se zaměřují na přepravu námořní cestou. Společnost Shell v době vydání této cestovní mapy aktivně vyvíjí velkou nádrž využitelnou pro námořní tankery o velikostech od 20 000 m³ do 100 000 m³. Cílem je snížit odpařování vodíku na úroveň 0,01–0,1 % denně a snížit investiční náročnost na maximálně 150 % ceny LNG tankerů^[83]. Kromě společnosti Shell demonstrovala společnost Kawasaki přepravu zkapalněného vodíku o objemu přibližně 1 250 m³.^[84] Kawasaki plánuje postavit tanker o objemu až 160 000 m³, tedy objemu, který se standardně používá pro přepravu zkapalněného zemního plynu^[85].

[77] Evropská komise, *Assessment of hydrogen delivery options*, 21. října 2022, 13, <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC130442>

[78] R. K. Ahluwalia, H. S. Roh, J-K Peng a D. Papadias, „*Liquid Hydrogen Technologies Workshop*“, 22 až 23. února 2022, <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-03/Liquid%20H2%20Workshop-ANL2.pdf>

[79] Evropská komise, *Assessment of hydrogen delivery options*, 21. října 2022, 13, <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC130442>

[80] Ibid., 14

[81] R. K. Ahluwalia, H. S. Roh, J-K Peng a D. Papadias, „*Liquid Hydrogen Technologies Workshop*“, 22 až 23. února 2022, <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-03/Liquid%20H2%20Workshop-ANL2.pdf>

[82] Evropská komise, *Assessment of hydrogen delivery options*, 21. října 2022, 13–14, <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC130442>

[83] Offshore Energy, *UK firm completes major liquid hydrogen vessel design for Shell*, 31. ledna 2023, <https://www.offshore-energy.biz/uk-firm-completes-major-liquid-hydrogen-vessel-design-for-shell/>

[84] Kawasaki, *Worlds First Liquefied Hydrogen Carrier SUIOSO FRONTIER Launches Building an International Hydrogen Energy Supply Chain Aimed at Carbon-free Society*, 11. prosince 2019, https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/?f=20191211_3487

[85] Kawasaki, *Kawasaki Obtains AIP Large 160 000 m³ Liquefied Hydrogen Carrier*, 22. dubna 2022, https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/?f=20220422_3378

Kryogenní nádrže na uskladnění vodíku v kapalném formě se aktuálně nacházejí na méně pokročilé technologické úrovni než pro stlačený vodík a jejich plné komercializace nebylo dosaženo.

4.2.5 Čpavek

Amoniak (čpavek) je derivát vodíku, který je veřejně obchodovanou komoditou o objemech okolo 20 milionů tun ročně^[86]. Právě jeho obchodovatelnost, a tedy funkční infrastruktura a fakt, že se jedná o stavební blok moderní civilizace nutný k udržení dostatečné potravinové produkce, z čpavku dělá kandidáta na skladování a přepravu vodíku o vyšších objemech. Čpavek je tradičně vyráběn prostřednictvím Haber-Boschova procesu, kdy reakcí dusíku s vodíkem při teplotách 400–550 °C a tlacích od 60 do 180 barů za přítomnosti železného katalyzátoru vzniká finální komodita^[87]. Čpavek je možné kromě přímé spotřeby zpětně krakovat za teplot od 350 do 900 °C a při tlaku přibližně 10 barů. Na závěr je vodík obvykle dočištěván k zajištění co nejvyšší čistoty vhodné například pro palivové články. Právě krakování je v současné době na relativně nízké technologické úrovni a do budoucna se očekává komercializace po světě obzvláště tam, kde bude nutné importem získávat vodík pro navazující procesy.

Značnou výhodou čpavku je jeho vysoká objemová hustota, přibližně 107,7 – 120 kg na 1 m³ pro zkapalněný čpavek, kdy přibližně 17,65 % celkové hmotnosti čpavku tvoří vodík^[88]. Čpavek se obvykle nachází v plynném skupenství za atmosférických podmínek, výhodou je, že při zkapalnění je nutné zchlazení čpavku pouze na -33 stupňů celsia a za zvýšeného tlaku je běžně skladován v kapalném formě. To výrazně snižuje celkovou energetickou náročnost skladování i přepravy. Výhodou čpavku i absence uhlíku v jeho chemickém vzorci.

Při uskladnění čpavku ve zkapalněné formě je možné dosáhnout kapacit uskladnění až 50 000 tun na jednom místě^[89]. Na rozdíl od zkapalněného vodíku je potenciální odpar čpavku udáván v hodnotách přibližně 0,04 % denně a je možné jej zpětně zachytit a opět zkapalnit. Potenciální uskladnění vodíku ve formě čpavku je ale nutné vnímat v kontextu toxicity čpavku a přistupovat k němu s obezřetností.

Přeprava čpavku je v současné chvíli řešena buďto prostřednictvím lodní nebo železniční dopravy. Společnost Mol v roce 2021 například objednala tanker na přepravu zkapalněného čpavku o celkovém objemu asi 87 000 m³, který je schopný přepravit až 58 000 tun amoniaku^[90]. Čpavek se do vnitrozemí přepravuje často po železnici kapalně v natlakovaných nádržích o objemu od 50–110 m³, přičemž v Evropě se udává hodnota přibližně 530 kg čpavku na 1 m³.^[91] Technologická připravenost přepravy i skladování čpavku je na nejvyšší úrovni, přičemž komerční připravenost je dnes již vzhledem k mezinárodní lodní přepravě také na velmi vyspělé úrovni.

4.3 Technologie, které zajišťují využití vodíku jako paliva a suroviny

Tato kapitola se zaměří na využití vodíku jako paliva a související technologie v návaznosti na *Net Zero Industry Act*, a tedy unijně primárně podporované technologie, které využívají vodík zpravidla k výrobě elektřiny a tepla, případně inovativně jako surovinu k výrobě. Jedná se primárně o palivové články. Kromě výše zmíněných technologií lze

[86] Mezinárodní agentura pro energii, *Global Hydrogen Review 2022*, <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022/executive-summary.2>

[87] Evropská komise, *Assessment of hydrogen delivery options*, 21. října 2022, 14, <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC130442>

[88] The Oxford Institute For Energy Studies, *Hydrogen storage for a net-zero carbon future*, duben 2023, 7, <https://a9w7k6q9.stackpathcdn.com/wpcms/wp-content/uploads/2023/04/ET23-Hydrogen-storage-for-a-net-zero-carbon-future.pdf>

[89] Evropská komise, *Assessment of hydrogen delivery options*, 21. října 2022, 16, <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC130442>

[90] Independent Commodity Intelligence Services, *Japan's MOL places order for world's largest ammonia tankers*, 10. srpna 2021, <https://www.icis.com/explore/resources/news/2021/08/10/10672554/japan-s-mol-places-order-for-world-s-largest-ammonia-tankers/>

[91] Evropská komise, *Assessment of hydrogen delivery options*, 21. října 2022, 17, <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC130442>

konstatovat, že řada aplikací vodíku mimo energetiku či mobilitu zaměřující se na využití vodíku jako suroviny se v průběhu dekád obecně zaměřovala na zvyšování energetické účinnosti a optimalizaci využívaných navazujících procesů^[92]. Konkrétně lze zmínit například technologie navázané na výrobu čpavku a methanolu, u kterých je zajištěno do budoucna využití kvůli neexistujícím alternativám pro výrobu těchto chemikálií. Jako příklad takovýchto technologií lze uvést elektricky zahřívané reaktory pro syntézu amoniaku^[93].

Rostoucí zájem o vodík v nechemickém sektoru, tedy zejména v oblasti mobility je možné pozorovat již od roku 2001. Podle IEA byl počet patentů zaměřený na oblast mobility vyšší než u všech ostatních navazujících technologií (kombinovaně) využívající vodík jako surovinu^[94]. Obecně, ale zájem o technologie pro oblast mobility, konkrétně palivové články začal být ztelnější ve vlnách již od 70. letech 20. století, a to vlivem dvou ropných krizí. Komerčně dostupnými se vodíková vozidla pro osobní mobilitu staly v 1. dekádě 21. století s modely nabízenými značkami Hyundai, Toyota či Honda^[95]. V sektoru energetiky se palivové články uplatňují v kogeneračních jednotkách a záložních zdrojích. Dalším inovativním způsobem využití vodíku s prozatím nízkou technologickou úrovní je využití vodíku primárně k přímé redukci železné rudy.

4.3.1 Palivové články

Palivové články jsou technologií, o kterou trvale narůstá zájem pro jejich vysokou efektivitu a bezemisní využití vodíku s jedinou odpadní látkou, kterou je demineralizovaná voda či vodní pára.^[96] Palivové články se v principu rozdělují na stacionární a mobilní a nízkoteplotní a vysokoteplotní. Podle elektrolytu se palivové články dělí podobně jako elektrolyzéry na palivové články s alkalickým elektrolytem, s protonově výměnnou membránou, kyselinou fosforečnou, taveninou z alkalických uhličitánů či s pevným oxidickým elektrolytem^[97]. V oblasti vodíkové mobility se se jako primární technologie uchytily především palivové články s protonově vodivou membránou (PEMFC) pro jejich skladnost, výkonovou flexibilitu, nižší teplotu provozu, vyšší životnost a rychlý start a relativně vysokou elektrickou účinnost v porovnání se spalovacími motory (v průměru 50 %, ale schopné i elektrické účinnosti vyšší jak 60 % při nižším zatížení)^[98]. Nevýhodou je nízká tolerance k znečištění vstupních plynů (vodíku a vzduchu) dodávaných do článku. Palivové články jsou relativně komplexní zařízení, které pro správný chod vyžadují řadu navazujících komponentů. Kromě samotných svazků, ve kterých probíhá elektrochemická reakce je součástí systému palivových článků, výkonová elektronika, plynové rozvody a regulace, vzduchový kompresor či zvlhčovač vzduchu^[99]. V samotném svazku palivových článků se nachází řada komponent, které tvoří samotný svazek. Jedná se především o bipolární desky, plynově difuzní vrstvy a kompozit membrány s nanesenými elektrodami (MEA)^[100]. Právě vlastnosti jednotlivých komponent jsou dlouhodobým zaměřením výzkumných snah o celkové snížení ceny palivových článků a zlepšování jednotlivých parametrů. Například bipolární desky tvoří přibližně 25–40 % celkové výsledné ceny svazku, podobně samotné MEA mají vliv na výslednou cenu svazku na úrovni přibližně 40 %^[101]. Samostatnou kapitolu představuje náročnost sestavení svazků, kdy plná automatizace výroby představuje nezbytný krok pro snížení koncové ceny. Je, ale

[92] Mezinárodní agentura pro energii, *Hydrogen Patents for a Clean Energy Future*, leden 2023, 59, <https://www.iea.org/reports/hydrogen-patents-for-a-clean-energy-future>

[93] *Ibid.*, 60

[94] *Ibid.*, 62

[95] Hyun Kyu Shin a Sung Kyu Ha, „A Review on the Cost Analysis of Hydrogen Gas Storage Tanks for Fuel Cell Vehicles“, *Energies*, 7. července 2023, 5, <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/13/5233>

[96] Česká vodíková technologická platforma, *Základní informace o vodíku*, <https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce>

[97] Zdeněk Porš, „*Palivové články*“, Ústav Jaderného Výzkumu Řež, 2002, 26-35, <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>

[98] Oficiální stránka Department of Energy Spojených států amerických, *Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office*, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells>

[99] Oficiální stránka Department of Energy Spojených států amerických, *Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office*, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells>

[100] Oficiální stránka Department of Energy Spojených států amerických, *Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office – Parts of Fuel Cell*, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells>

[101] Rolando Pedicini, Marcelo Romagnoli, Paolo E. Santangelo, „A Critical Review of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Systems for Automotive Applications: Components, Materials and Comparative Assessment“, *Energies*, 29. března 2023, 19-20, <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/7/3111>

nutné si uvědomit, že snižování ceny jednotlivých komponent svazku nemusí mít v konečném důsledku tak výrazný vliv na snížení ceny celého systému, a proto je nutné odlišovat cenu svazku od ceny celého systému.

Častým argumentem, který se objevuje v otázce výroby palivových článků, je obsah nákladné platiny v palivovém článku nanesený na vrstvu katalyzátoru na jednotlivých elektrodách. Současné modely vodíkových vozidel zpravidla u systémů o výkonu okolo 100 kW využívají přibližně 30 gramů platiny^[102]. Toto množství se daří dlouhodobě snižovat. Do roku 2050 se očekává postupné snížení na úroveň, která je v současnosti nutná ke správné funkčnosti katalyzátorů aut se spalovacím motorem, tedy přibližně 8–10 g na jeden systém^[103]. Značnou výhodou je také relativně jednoduchá recyklovatelnost a z toho plynoucí znovuzískání platiny, který může významně dopomoci celkovému snížení potřeby těžby platiny vycházející z postupného rozšiřování vodíkových vozidel s palivovými články. Mezinárodní agentura pro obnovitelnou energii (IRENA) odhaduje, že v roce 2030 bude potenciální rozdíl mezi poptávkou a nabídkou platiny okolo 24 % rozdíl, což je v porovnání s dalšími klíčovými materiály pro energetickou tranzici, jakými je třeba lithium relativně malý rozdíl^[104]. Technologická úroveň PEMFC se pohybuje na vyšší úrovni 9, kdy klíčovým bodem rozvoje palivových článků je nastartování sériové výroby o stovkách tisíc systémů ročně, které by měly v budoucnu vést k snižování ceny za instalovanou kW výkonu^[105]. Komerční připravenost je také na vyšší úrovni než 1, ale v porovnání například s bateriovými technologiemi jsou palivové články méně komercializované.

Druhým rozšířeným typem palivových článků, který je vhodný spíše pro stacionární aplikace jsou palivové články s pevnými oxidy (SOFC). Ty mají značnou výhodu v relativně vysoké elektrické účinnosti okolo 60 % a schopnosti vygenerovat i vysokoteplotní odpadní teplo, čímž je možné systémovou účinnost celého procesu zvýšit na až 85 %^[106]. SOFC mohou pracovat při teplotách do 1 000 °C, čímž je možné se vyhnout použití katalyzátorů z platinových kovů. Výhodou této technologie je zároveň vyšší odolnost k nečistotám paliva a možnost využití i jiných paliv (především metanu) než jen samotného vodíku. SOFC je také možné provozovat v reverzním režimu jako elektrolyzátor k výrobě vodíku. Nevýhodou vysokoteplotních článků je pomalý start daný nutností dosažení provozní teploty a horší životnost jednotlivých materiálů^[107]. Technologie pro výrobu elektřiny zpět z vodíku ve stacionárních aplikacích je dnes řešena především PEMFC technologií^[108]. To je dáno vysokou flexibilitou provozu. Naopak při použití zemního plynu u kontinuálně pracujících jednotek jsou využívány vysokoteplotní technologie např. palivové články s taveninou uhličitánů. Japonsko je zemí s nejvyšším množstvím instalované kapacity. Stacionární aplikace pro rodinné domy většinou využívají PEMFC či SOFC ke kombinované výrobě elektřiny a tepla na místě a poskytují tak flexibilitu zejména v případě nedostatečné kapacity distribuční sítě v místě instalace palivového článku. V případě zálohování, například datových center či v dalších aplikacích je opět rozhodující flexibilita článku. Do roku 2020 bylo největší množství instalovaných jednotek palivových článků pro stacionární aplikací PEMFC, na druhém místě se umístila technologie SOFC, přičemž s velkým odstupem bylo za těmito technologiemi byly palivové články využívající methanol napřímo (DMFC) a následně alkalické palivové články^[109]. Celková životnost palivových článků pro stacionární aplikace je podle *Clean Hydrogen Partnership* prokázána k 10 letům výdrže svazku a přibližně 15 letům výdrže celého systému^[110]. SOFC

[102] Bruno G. Pollet, Shyam S. Kocha, Iain Staffell, „Current Status of Automotive Fuel Cells for Sustainable Transport“, *Current Opinion in Electrochemistry*, srpen 2019, 90-91 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2451910319300651>

[103] *Ibid.*, 91

[104] Mezinárodní agentura pro obnovitelnou energii, *Geopolitics of the Energy Transition: Critical Materials*, červenec 2023, 28-29, <https://www.irena.org/Publications/2023/Jul/Geopolitics-of-the-Energy-Transition-Critical-Materials>

[105] Mezinárodní agentura pro energii, *Hydrogen Patents for a Clean Energy Future*, leden 2023, 64, <https://www.iea.org/reports/hydrogen-patents-for-a-clean-energy-future>

[106] Oficiální stránka Department of Energy Spojených států amerických, *Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office – Types of Fuel Cell*, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells> <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells>

[107] *Ibid.*

[108] Viviana Cigolotti, Matteo Genovese, Petronilla Fragiaco, „Comprehensive Review on Fuel Cell Technology for Stationary Applications as Sustainable and Efficient Poly-Generation Energy Systems“, *Energies*, 13. srpna 2021, 6-7, <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/16/4963>

[109] *Ibid.*, 9-10

[110] *Clean Hydrogen Partnership*, *Strategic Research and Innovation Agenda 2021-2027*, 28. února 2022, 76, https://www.clean-hydrogen.europa.eu/about-us/key-documents/strategic-research-and-innovation-agenda_en

technologie je na nižší technologické úrovni v porovnání s PEMFC, přesto se její komercializace očekává v druhé polovině 20. let.

Pro větší výkony je možné uvažovat i o zařízeních spalujících vodík jako jsou spalovací motory a turbíny. Tato zařízení jsou dnes běžná pro zemní plyn a bioplyn, nicméně výrobci je stále více zaměřují na kompatibilitu s vodíkem. Přes nižší účinnost, než mají palivové články, je použití prověřených způsobů spalování vhodnou alternativou pro kogenerační jednotky, a to z důvodu vyšší tolerance nečistot plynů.

4.3.2 Komponenty pro vodíkové technologie

Česká republika má dlouhou tradici a s tím spojené know-how v oblasti strojírenské výroby, elektrotechnice i výrobě materiálů. Vodíkové technologie vedle svazků elektrolyzérů a palivových článků vyžadují širokou škálu zařízení nutných pro funkci systémů. Jedná se o kompresory, dmyhadla, filtrace, regulace tlaku a průtoků plynů, separátory, zvlhčovače, tepelné výměníky atp. V oblasti výkonové elektroniky pak jde o měniče napětí, usměrňovače, senzory atp. V případě materiálů jde například o žáruvzdorné materiály pro vysokoteplotní aplikace, materiály vhodné pro skladování a transport vodíku, filtrační materiály a sorbenty pro čištění vodíku i vzduchu. Pozornost výrobců se bohužel zaměřuje jiným směrem a jen okrajově vznikají produkty „hydrogen ready“. To představuje nevyužitý potenciál tuzemského průmyslu, kdy zaplnění současných mezer na trhu může pro řadu z nich představovat možnost získání pozice na vznikajícím mezinárodním trhu. Především v oblasti výroby komponent pro spalovací motory lze očekávat útlum výroby a současní výrobci teď mají šanci vytváření nových obchodních vztahů v době, kdy trh ještě není zcela nasycen.

5. Podmínky unijní legislativy a její možné důsledky pro Českou republiku

Tato kapitola detailně popisuje současný stav legislativy na unijní úrovni. Jejím cílem je představit konkrétní a nejdůležitější legislativní návrhy, které mají za cíl posílit rozvoj vodíkového hospodářství v Evropské unii i České republice.

Unijní legislativa začala na vodík ve větší míře poukazovat od roku 2020, kdy došlo k publikaci Vodíkové strategie pro klimaticky neutrální Evropu. Ta vůbec poprvé samostatně identifikovala vodík jako jeden z klíčových prostředků dekarbonizace zejména těžko elektrifikovatelných odvětví, jakými jsou chemický průmysl, ocelářství, energetika nebo těžká nákladní, lodní a letecká doprava^[111]. Evropská komise, která je za dokument zodpovědná, představila cíl výstavby až 40 GW výkonu elektrolyzérů do roku 2030 v Evropské unii a 40 GW výkonu elektrolyzérů mimo unijní státy.

Strategie Evropské unie se do značné míry poupravila po 24. únoru 2022, kdy Ruská federace zaútočila v aktu agrese na Ukrajinu. Vzhledem k tomu, že se naplnily obavy o nespolehlivost dodávek energií z Ruska, byla Evropská unie nucena představit nový strategický plán s názvem *REPowerEU*, ve kterém se kromě plánu výrazně zrychlit výstavbu obnovitelných zdrojů energie, zaměřila i na rozvoj vodíkového hospodářství. Nově by tak členské státy Evropské unie měly kolektivně dosáhnout výroby až 10 milionů tun obnovitelného vodíku. Komise také navýšila cíle importu ideálně obnovitelného vodíku na dalších 10 milionů tun. Tyto cíle by měly být naplněny do konce tohoto desetiletí, přitom tento rok se podle dat společnosti BloombergNEF očekává, že počet prodaných elektrolyzérů vzroste na rozmezí mezi 1,8 až 2,4 GW v roce 2022 oproti sotva 0,5 GW v roce 2021^[112].

Na *REPowerEU* a požadavky trhu reagovali výrobci elektrolyzérů podepsáním společného memoranda o spolupráci na rozvoji výrobních kapacit. Celkem 20 evropských společností se zaměří na navýšení výrobní kapacity na úroveň 17,5 GW ročně do roku 2025^[113]. Přestože kapacity na výrobu do budoucna porostou, výroba asi 10 milionů tun obnovitelného vodíku si v Evropě vyžádá ročně asi 500 TWh elektrické energie z obnovitelných zdrojů^[114].

Ve světle plánovaných objemů výroby obnovitelného vodíku byly Komisí předloženy i jednotlivé kroky unijní legislativy, které cílí na podporu jak spotřeby, tak výroby vodíku. Prvním velkým souborem unijních právních předpisů se stal v červenci 2021 publikovaný balíček „Fit for 55“^[115]. Ten řeší celou řadu problematik od systému EU pro obchodování s emisními povolenkami, snižování emisí v dopravě u osobních automobilů a dodávek, navýšení podílu obnovitelných zdrojů energie, energetickou účinnost nebo infrastrukturu pro alternativní paliva, zdanění k přírodě šetrných i nešetrných paliv a otázku ekologičtějších paliv v lodní a letecké dopravě. Jako naprosto klíčovou legislativu lze z hlediska rozvoje vodíkového hospodářství v ČR identifikovat zejména revizi směrnice o obnovitelných zdrojích energie^[116] a nové nařízení o zavádění infrastruktury pro alternativní paliva^[117].

[111] Evropská komise, *Vodíková strategie pro klimaticky neutrální Evropu (2020)*, <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2020:0301:FIN:CS:PDF>.

[112] Bloomberg, „A Green hydrogen Economy Depends on This Little-Known Machine“, 22. července 2022, <https://www.bloomberg.com/news/features/2022-07-22/the-key-technology-behind-the-green-hydrogen-economy>.

[113] „Electrolyser Summit Joint Declaration“, oficiální stránka Evropské komise, <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/50014>.

[114] Ibid.

[115] „Balíček „Fit for 55“,“ oficiální stránka Evropské rady a Rady Evropské unie, <https://www.consilium.europa.eu/cs/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>.

[116] Evropská komise, *Amendment to Directive 2018/2001 on the promotion of energy from renewable sources (2021)*, https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/amendment-renewable-energy-directive-2030-climate-target-with-annexes_en.pdf.

[117] Evropská komise, *Regulation on the deployment of alternative fuels infrastructure (2021)*, https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:dbb134db-e575-11eb-a1a5-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF.

Podobně důležitým legislativním balíčkem je v prosinci 2021 vydaný návrh celoevropského rámce pro dekarbonizaci trhů se zemním plynem a podporu využívání vodíku a snížení emisí metanu^[118]. Jeho součástí je nařízení o vnitřním trhu s plyny z obnovitelných zdrojů, se zemním plynem a s vodíkem^[119] a směrnice o společných pravidlech pro vnitřní trh s plyny z obnovitelných zdrojů, se zemním plynem a s vodíkem^[120].

5.1 Revize směrnice o obnovitelných zdrojích energie

Pro oblast rozvoje vodíkového hospodářství se jedná o klíčovou směrnici, která podporuje výrobu a využití obnovitelného vodíku v sektorech dopravy a průmyslu. Finální podoba směrnice byla dojednána v březnu 2023 mezi Evropským parlamentem, Radou EU a Evropskou komisí^[121]. Členské státy by se dle směrnice měly na unijní úrovni snažit dosáhnout kolektivního zvýšení podílu obnovitelné energie na koncové spotřebě, a to minimálně na úroveň 42,5 %.

Základním požadavkem celé směrnice jsou cíle, které jsou nově stanoveny pro vodík v oblasti dopravy a průmyslu. Tyto cíle se vztahují ke spotřebě obnovitelného vodíku pro energetické i neenergetické účely a jsou schovány pod termínem využívání obnovitelných paliv nebiologického původu (RFNBO) ve výše zmíněných sektorech. Pro oblast průmyslu Evropská komise ve svém návrhu směrnice uvádí cíl používat až 42 % obnovitelných paliv nebiologického původu, v tomto případě obnovitelného vodíku, do roku 2030 a 60 % do roku 2035.

Cíle pro obnovitelný vodík se týkají všech provozů, ve kterých je v současné chvíli využíván vodík, převážně vyráběný z fosilních zdrojů. Mezi tyto provozy můžeme zahrnout výroby amoniaku, chemické provozy, které vyrábí vodík, aby z něj následně mohly vyrábět například léky, ocelárny využívající směs vodíku a dalších plynů k redukci železné rudy, výroby rafinovaných ropných produktů a další provozy, které jsou definovány v nařízení, kterým se zavádí statistická klasifikace ekonomických činností NACE Revize 2, a kterým se mění nařízení Rady (EHS) č. 3037/90 a některá nařízení ES o specifických statistických oblastech^[122]. Jedná se o sekce B, C, F a J (viz obrázek 7).

[118] Evropská komise, „Evropská komise předložila návrh nového celoevropského rámce pro dekarbonizaci trhů se zemním plynem, podporu využívání vodíku a snížení emisí metanu“, 15. prosince 2021, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/cs/ip_21_6682.

[119] Evropská komise, *Nařízení o vnitřním trhu s plyny z obnovitelných zdrojů, se zemním plynem a s vodíkem (2021)*, https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:0c903f5a-5d8b-11ec-9c6c-01aa75ed71a1.0008.02/DOC_1&format=PDF.

[120] Evropská komise, *Směrnice o společných pravidlech pro vnitřní trh s plyny z obnovitelných zdrojů, se zemním plynem a s vodíkem (2021)*, https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:2f4f56d6-5d9d-11ec-9c6c-01aa75ed71a1.0024.01/DOC_1&format=PDF.

[121] <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/03/30/council-and-parliament-reach-provisional-deal-on-renewable-energy-directive/>

[122] *Nařízení, kterým se zavádí statistická klasifikace ekonomických činností NACE Revize 2 a kterým se mění nařízení Rady a některá nařízení ES o specifických statistických oblastech (2019)*, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:02006R1893-20190726&from=EN>.

B	Mining and quarrying	05 to 09
CA	Manufacture of food products, beverages and tobacco products	10 to 12
CB	Manufacture of textiles, apparel, leather and related products	13 to 15
CC	Manufacture of wood and paper products, and printing	16 to 18
CD	Manufacture of coke, and refined petroleum products	19
CE	Manufacture of chemicals and chemical products	20
CF	Manufacture of pharmaceuticals, medicinal chemical and botanical products	21
CG	Manufacture of rubber and plastics products, and other non-metallic mineral products	22 + 23
CH	Manufacture of basic metals and fabricated metal products, except machinery and equipment	24 + 25
CI	Manufacture of computer, electronic and optical products	26
CJ	Manufacture of electrical equipment	27
CK	Manufacture of machinery and equipment n.e.c.	28
CL	Manufacture of transport equipment	29 + 30
CM	Other manufacturing, and repair and installation of machinery and equipment	31 to 33
F	Construction	41 to 43
JA	Publishing, audiovisual and broadcasting activities	58 to 60
JB	Telecommunications	61
JC	IT and other information services	62 +63

Obrázek 7: Tabulka značící jednotlivé sektory průmyslu spadající pod povinnost navyšování RFNBO do roku 2030 a 2035

Pro Českou republiku by měla směrnice v sektoru průmyslu při naplnění 42 % a 60 % RFNBO znamenat spotřebu přibližně 24 658 tun obnovitelných paliv nebiologického původu do roku 2030 a 35 227 tun obnovitelných paliv nebiologického původu do roku 2035. Největšími spotřebiteli RFNBO vodíku v průmyslu by měly být společnosti Orlen Unipetrol a BorsodChem MCHZ.

V sektoru dopravy revize směrnice stanovuje závazné obecné cíle, které se zaměřují buďto na redukci až 14,5 % skleníkových plynů v sektoru dopravy, nebo zvýšení podílu obnovitelné energie v sektoru dopravy o 29 % v porovnání s rokem 1990, přičemž každý členský stát si může sám zvolit, který z těchto cílů bude plnit. Cíl pro RFNBO je nově stanoven v rámci kombinovaného cíle 5,5 % pro RFNBO, pokročilá biopaliva a bioplyn do roku 2030, přičemž minimálně 1 % z celkové spotřeby energie musí být z RFNBO, a to buďto přímo ve formě vodíku, nebo v rámci spotřeby konvenčních či biopaliv vyráběných z obnovitelného vodíku. K povinnému cíli pro RFNBO je zaveden multiplikátor 2x pro energii dodanou do sektoru dopravy, fakticky tak musí být minimální podíl RFNBO v sektoru dopravy 0,5 % energeticky. V strategii *REPowerEU* hovoří Komise o návrhu navyšování až na 5 %. Toto navyšování nicméně není reflektováno ve finálním textu směrnice.

Pro Českou republiku by cíl 1 % obnovitelných paliv nebiologického původu v dopravě znamenal spotřebu 11 700 tun RFNBO ročně v celém sektoru dopravy (vypočítáno na základě spotřeby paliv z roku 2021 v rámci metodiky SHARES).

Přehled původních cílů včetně schváleného kompromisu je možné zhlédnout v následující tabulce.

Unijní instituce	Cíl pro dopravu (2030)	Cíl pro průmysl (2030)
Evropská komise	2,6 % RFNBO (cíl je povinný pro každý čl. stát)	50 % RFNBO v průmyslu (cíl je povinný pro každý čl. stát)
Rada Evropské unie	2,6 % RFNBO (cíl je pouze indikativní, uvažuje se o využití multiplikátoru)	35 % RFNBO v průmyslu (cíl je povinný pro každý členský stát)
Evropský parlament	5,7 % RFNBO (cíl je povinný pro každý čl. stát)	50 % RFNBO v průmyslu (cíl je povinný pro každý čl. stát)
Finální kompromis	1 % RFNBO (cíl je povinný pro každý členský stát) multiplikátor 2x	42 % RFNBO v průmyslu do roku 2030 a 60 % RFNBO do roku 2035 (cíl je povinný pro každý čl. stát)

5.2 Akt v přenesené pravomoci k výrobě obnovitelných paliv nebiologického původu

Už v roce 2018 byla do směrnice o obnovitelných zdrojích energie inkorporována povinnost Evropské komisi vypracovat dva akty v přenesené pravomoci^[123], které se zaměřují na stanovení pravidel výroby obnovitelných paliv nebiologického původu a metodu výpočtu emisí, které vznikají při výrobě tohoto typu vodíku. Evropská komise měla oba akty v přenesené pravomoci dokončit již na konci roku 2021^[124]. Jejich finální publikace se zpozdila a Komise oficiálně akty v přenesené pravomoci publikovala v únoru 2023^[125]. Akty v přenesené pravomoci vstoupily v platnost v červenci 2023. Pro rozvoj vodíkového hospodářství založeném na obnovitelném vodíku je nejdůležitější akt v přenesené pravomoci k výrobě obnovitelných paliv nebiologického původu. Ty jakožto jedinou vhodnou technologii pro výrobu obnovitelného vodíku stanovují elektrolýzu.

Akt v přenesené pravomoci k výrobě obnovitelných paliv nebiologického původu stanovuje zejména pravidla pro výrobu obnovitelného vodíku v případě použití elektrické energie z elektrizační soustavy, či při přímém napojení. Jedná se zejména o pravidla časové korelace, geografické korelace, adicionality a umožnění výroby obnovitelného vodíku v elektrolýzě.

[123] Akt v přenesené pravomoci je legislativní nástroj Evropské komise, který umožňuje na základě mandátu Rady Evropské unie a Evropského parlamentu Komisi zpracovávat doplňující legislativu ke konkrétním problematikům, například definici obnovitelného vodíku.

[124] Evropská komise, *odpověď eurokomisařky Cadi Simson na dotaz ohledně aktu v přenesené pravomoci k obnovitelnému vodíku (2021)*, https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/E-9-2021-003258-ASW_EN.pdf.

[125] Evropská komise, *Commission sets out rules for renewable hydrogen*, 13.února 2023, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_594

Možnosti výroby RFNBO podle pravidel aktů v přenesené pravomoci:

Cesta č. 1:

Využití průměrný podíl obnovitelných zdrojů z nezasmluvněné elektřiny z elektrizační soustavy

Článek 27 směrnice o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů, bod 6 uvádí: „*Je-li pro výrobu obnovitelných paliv nebiologického původu používána elektřina, a to buď přímo, nebo pro výrobu meziproduktů, použije se k určení podílu elektřiny z obnovitelných zdrojů průměrný podíl elektřiny z obnovitelných zdrojů v zemi výroby ve výši naměřené dva roky před dotčeným rokem.*“

Při hypotetické výrobě vodíku z elektřiny ze sítě by v České republice v roce 2020 bylo možné prohlásit 13 % spotřebované elektřiny v elektrolyzáru za plně obnovitelnou a vyrábět z této elektřiny obnovitelný vodík.^[126]

Při využití elektřiny ze sítě je, ale nutné počítat s tím, že emisní náročnost výroby obnovitelného vodíku v rámci jednoho měsíce nesmí překročit 3,38 kg CO₂ na 1 kg vyrobeného vodíku. Emise se průměrují do všech kilogramů, které elektrolyzáru v daný měsíc vyrobil. V České republice lze využít průměrný podíl obnovitelných zdrojů k navýšení výroby RFNBO v elektrolyzáru, toto navýšení je, ale procentuálně nízké z důvodu vysoké emisní náročnosti elektřiny vyrobené v ČR a relativně nízkému podílu obnovitelných zdrojů.

Cesta č. 2:

Přímé napojení elektrolyzáru na obnovitelný zdroj energie

Napojení elektrolyzáru přímo na obnovitelný zdroj energie (s výjimkou zdroje vyrábějícího elektřinu z biomasy) lze pouze na zdroje elektrické energie, které nebyly spuštěny dříve než 36 měsíců před instalací elektrolyzáru. Pokud je přidána další kapacita elektrolyzáru, je elektrolyzáru vnímán jako kdyby byl spuštěn v původním čase, pokud je kapacita doplněna do 36 měsíců od výstavby elektrolyzáru. Pokud je vodík vyráběn přímo ze zdroje, není nutné plnit kromě pravidla adicionality žádné další podmínky. Zdroj OZE může být podpořen investičně či provozně.

[126] Ministerstvo průmyslu a obchodu, *Podíl obnovitelných zdrojů energie na hrubé konečné spotřebě energie 2010–2021, metodika Eurostat – Shares*, prosinec 2022, <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/obnovitelne-zdroje-energie/2023/1/Podil-OZE-na-hrube-konecne-spotrebe-energie-2010-2021.pdf>

Cesta č. 3:

Plně obnovitelná elektřina zasmluvněná prostřednictvím PPA kontraktu mezi výrobcem a spotřebitelem a odebírána ze sítě

Aby mohla být elektřina odebírána ze sítě prohlášena za plně obnovitelnou je nezbytné naplnit pravidla adicionality, časové a geografické korelace a s výrobcem obnovitelné energie uzavřít PPA kontrakt^[127] (může jich být více simultánně). Pravidla pro výrobu obnovitelného vodíku musí být splněna všechna dohromady a jsou následující:

Adicionalita: V případě, že je elektrolyzátor napojen na elektrizační soustavu lze k napájení elektrolyzátoru využít pouze nový obnovitelný zdroj energie, který nebyl spuštěn dříve jak 36 měsíců před spuštěním elektrolyzátoru. Se zdrojem je nutné uzavřít PPA kontrakt. Obnovitelný zdroj energie nesmí být podpořen žádnou investiční a provozní podporou (s výjimkou instalací, které získaly podporu před tím, než došlo k jejich modernizaci a u instalací, kde již byla podpora zcela ukončena). Pouze v elektrolyzérech, které fungují za účelem testování, výzkumu nebo demonstrace, lze využít obnovitelný zdroj energie, který byl nebo je podpořen provozně či investičně. V případě, že PPA kontrakt naplňující kritérium adicionality bude ukončen, další PPA kontrakt se stejným zdrojem lze opět uzavřít bez komplikací.

Do 1. ledna 2028 platí pro všechny nově postavené elektrolyzéry výjimka z principu adicionality, která umožňuje uzavřít PPA kontrakt i se starším zdrojem než 36 měsíců. Takovýto zdroj navíc může být investičně či provozně podpořen. Výjimka pro všechny projekty spuštěné do 1. ledna 2028 platí do 1. ledna 2038.

Časová korelace: Výroba elektřiny v obnovitelném zdroji energie a spotřeby dané elektřiny v elektrolyzátoru musí být prokázána v řádech jednotlivých měsíců do 31. prosince 2029. Od roku 2030 je nutné u všech elektrolyzátorů prokazovat výrobu a spotřebu hodinově.

Pokud je cena elektrické energie na vnitrodenním trhu nižší než 20 € nebo je cena nižší než 0,36 hodnoty ceny emisní povolenky během daného období, není nutné plnit kritérium časové korelace.

Geografická korelace: Elektrolyzátor se musí nacházet ve stejné obchodní (nabídkové) zóně jako obnovitelný zdroj energie, případně lze využít elektřinu ze zasmluvněného obnovitelného zdroje z propojené nabídkové zóny, ale tato elektřina splní kritérium geografické korelace jen pokud je cena zelené elektřiny vyšší nebo stejná jako v obchodní zóně, kde se elektrolyzátor nachází.

Výroba obnovitelného vodíku při poskytování systémových služeb: V případě, že nastane časové období, kdy je vhodné využít elektrolyzér k vyrovnávání elektrizační soustavy je možné prohlásit vyrobený vodík v daném období za obnovitelný pokud výrobce na základě evidence od operátora trhu s elektřinou prokáže, že a) u elektráren využívající obnovitelné zdroje energie došlo k redispečinku *směrem dolu* v návaznosti na článek 13 Nařízení (EU) 2019/943; b) a elektřina spotřebovaná v elektrolyzátoru snížila nutnost redispečinku v daném množství spotřebované elektřiny.

Výše zmíněné cesty výroby vodíku lze kombinovat, v praxi je, ale nutné vždy odlišit z jakého zdroje byla elektřina pro výrobu obnovitelného vodíku v elektrolyzátoru využita.

[127] Dle definice směrnice o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů, článku 1, bodu 14p znamená „renewable energy purchase agreement“, neboli dlouhodobá smlouva o dodávce energie za pevnou či indexovanou cenu, kontrakt v rámci něhož se mohou fyzické a právnické osoby dohodnout na nákupu obnovitelné energie napřímo s výrobcem elektrické energie. Kontrakty ale nejsou omezeny pouze na elektrickou energii, ale mohou zahrnout i nákup obnovitelného tepla nebo chladu.

5.3 Revize nařízení o zavádění infrastruktury pro alternativní paliva (AFIR)

Politické dohody k nařízení o zavádění infrastruktury pro alternativní paliva bylo dosaženo 28. března 2023. Nařízení by mělo vejít v platnost dvacátým dnem po vyhlášení v Úředním věstníku Evropské unie, přičemž plošně by mělo nabýt účinnosti 6 měsíců po vzetí v platnost^[128]. Cílem nařízení AFIR je akcelarovat přechod k nízkoemisní mobilitě prostřednictvím zavázání členských států k povinné výstavbě infrastruktury pro alternativní paliva, zejména dobíjecích stanic pro elektromobily a vodíkových plnicích stanic pro vozidla s palivovým článkem. AFIR má za cíl vytvořit na vybraných trasách transevropské dopravní sítě hustou sítí infrastruktury pro vydávání vodíku a dobíjení elektromobilů. Nové evropské nařízení zavazuje členské státy k rozvoji plnicích stanic jednak na hlavních sítích TEN-T^[129] a jednak v oblastech městských uzlů^[130]. Plnicí stanice by měly sloužit primárně pro lehká užitková a těžká nákladní vozidla. Podmínky pro plnicí stanice definuje článek 6 a 7. V tabulce níže uvádíme stručný přehled hlavních bodů, které dle nařízení musejí být naplněny, jak v případě hlavních sítí TEN-T, tak i v případě městských uzlů.

Hlavní síť TEN-T	Městské uzly
Každých 200 kilometrů pouze na hlavních sítích TEN-T, plnicí stanice by se měla nacházet do 10 kilometrů od hlavní TEN-T sítě.	Každý městský uzel definovaný v Nařízení o hlavních směrech Unie pro rozvoj transevropské dopravní sítě (TEN-T).
Minimální denní kumulativní výdej v každé oblasti 1 tuna vodíku	Minimální denní kumulativní výdej není definován
Minimálně 700 barů plnění	Minimální výdejní tlak není definován
Cíl minimální počtu plnicích stanic by měl být naplněn do 31. prosince 2030	Cíl minimální počtu plnicích stanic by měl být naplněn do 31. prosince 2030
Provozovatelé plnicích stanic by měli umožnit plnění koncovým zákazníkům na základě ad hoc přístupu, a to minimálně prostřednictvím buďto čtečky kreditních karet, nebo bezkontaktních zařízení schopných načíst kreditní karty	Provozovatelé plnicích stanic by měli umožnit plnění koncovým zákazníkům na základě ad hoc přístupu, a to minimálně prostřednictvím buďto čtečky kreditních karet, nebo bezkontaktních zařízení schopných načíst kreditní karty
Cena vodíku musí být viditelně indikována na základě přepočtu ceny na 1 kg vydaného vodíku	Cena vodíku musí být viditelně indikována na základě přepočtu ceny za 1 kg vydaného vodíku
V případě, že dopravní kapacita dané hlavní sítě TEN-T, kde se plnicí stanice nachází nepřekročí denní provoz 2000 těžkých nákladních vozidel, nebo z jiných socio-ekonomických důvodů, může být minimální kapacita výdeje plnicí stanice za den na dané síti snížena o 50 %, přičemž vzdálenost a minimální tlak plnění musí být zachován	Bez jakýchkoliv výjimek

Nařízení dále stanovuje členským státům povinnost do 1. ledna 2025 vytvořit předběžný návrh národního plánu na postupný rozvoj plnicích stanic a poptávky po vodíku (finální dokument v roce 2026) zaměřující se již na rok 2027, a to v rámci vlastní národní strategie s trajektorií výstavby plnicích stanic až k roku 2030. Evropská komise (dále jen

[128] Rada Evropské Unie, *Alternative fuel infrastructure: Provisional Agreement for more recharging and refuelling stations across Europe*, 28. března 2023, <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/03/28/alternative-fuel-infrastructure-provisional-agreement-for-more-recharging-and-refuelling-stations-across-europe/>

[129] Transevropská dopravní síť (TEN-T) je definována v nařízení o hlavních směrech pro rozvoj transevropské sítě, které stanovuje dlouhodobou strategii pro rozvoj úplně sítě TEN-T zahrnující železniční, námořní a leteckou dopravu, silnice, vnitrozemské vodní cesty, terminály železniční a silniční dopravy. Dělí se na globální a hlavní síť, přičemž hlavní síť má strategický význam tím, že spojuje městské a další uzly (přístavy, letiště, hraniční přechody).

[130] Městské uzly jsou definovány v příloze II nařízení o hlavních směrech pro rozvoj transevropské dopravní sítě.

Komise) by měla do konce roku 2024 připravit technologický a tržní report k vývoji trhu u těžké nákladní dopravy, a to v kontextu dobíjecí a plnicí infrastruktury, a ten následně aktualizovat ke konci roku 2026 a následně každých 5 let.

Do finálního množství plnicích stanic nutných vybudovat na území České republiky se propisuje podoba nařízení o hlavních směrech Unie pro rozvoj transevropské dopravní sítě, jejíž revize zvyšuje počet městských uzlů až na 10. Nově by tak podle předpokladů v roce 2030 mělo být v České republice povinně vybudováno na 16 plnicích stanic.

Unijní instituce	Počet plnicích stanic v ČR podle návrhu	Národní akční plán čisté mobility (NAPČM)
Evropská komise	20	40
Rada Evropské unie	5	
Evropský parlament	27	
Finální kompromis	16	

5.4 Směrnice o společných pravidlech pro vnitřní trh s plynem z obnovitelných zdrojů, se zemním plynem a s vodíkem a nařízení o vnitřním trhu s obnovitelnými plynem, zemním plynem a vodíkem

Směrnice a nařízení jsou součástí dekarbonizačního balíčku pro trh s plynem, který Evropská komise představila v prosinci 2021^[131]. Balíček počítá s dvěma fázemi pravidel, které by měly být uplatněny do roku 2030 a od roku 2030. Základně rozděluje plyn na obnovitelné a nízkouhlíkové, které mají během celého svého životního cyklu o 70 % nižší emisní zátěž než referenční zemní plyn. Legislativa řeší souhrnně otázku definice a výpočtu emisní náročnosti nízkouhlíkového vodíku, unbundling pro společnosti, které se na trhu s plynem pohybují, závazné vypracování plánu rozvoje přepravní infrastruktury, maximální možnou míru přeshraničního množství vodíku v propojovacích uzlech od roku 2025 a další důležité aspekty rozvoje vodíkového hospodářství v kontextu trhu s plynem.

Pro Českou republiku je zcela klíčový návrh definice nízkouhlíkového vodíku. Ten je v návrhu Evropské komise definován jako vodík, jehož energetický obsah je získán z neobnovitelných zdrojů, který splňuje prahovou hodnotu snížení emisí skleníkových plynů ve výši 70 % (oproti fosilnímu komparátoru v podobě parního reformování zemního plynu)^[132]. Právě věta „jehož energetický obsah je získán z neobnovitelných zdrojů“ je problematická, a to zejména z toho důvodu, že vylučuje skutečnost definovat nízkouhlíkovým vodíkem vodík z výroby, kde existuje mix vstupních elektrických zdrojů jak obnovitelného, tak neobnovitelného charakteru. Pokud by tato definice prošla do finálního znění i po přispění Rady EU a Evropského parlamentu, některé vodíkové projekty v České republice by mohly být z důvodu nevhodné certifikace vodíku zkomplikovány. Typickým příkladem jsou zamýšlené projekty na území Moravskoslezského kraje, kde společnost Veolia plánuje vyrábět vodík z kombinace elektřiny vyrobené ve fotovoltaické elektrárně a elektřiny vyrobené z biomasy^[133]. Právě při využití biomasy nespadá vyrobený vodík ani do definice obnovitelného, ani do definice nízkouhlíkového. I proto je pro ČR naprosto klíčové debatu o nízkouhlíkovém vodíku nadále sledovat a v ideálním případě docílit toho, aby definice zůstala jen na úrovni snížení prahové hodnoty emisí skleníkových plynů ve výši 70 %. Do nízkouhlíkového vodíku lze zařadit i vodík vyráběný z elektřiny z jaderných zdrojů

[131] Evropská komise, *Evropská komise předložila návrh nového celoevropského rámce pro dekarbonizaci trhů se zemním plynem, podporu využívání vodíku a snížení emisí metanu*, 15. prosince 2021, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/cs/ip_21_6682.

[132] Evropská komise, *Směrnice o společných pravidlech pro vnitřní trh s plynem z obnovitelných zdrojů, se zemním plynem a s vodíkem (2021)*, https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:2f4f56d6-5d9d-11ec-9c6c-01aa75ed71a1.0024.01/DOC_1&format=PDF.

[133] Veolia, „Veolia a VŠB-TUO budou společně rozvíjet využití vodíku v Moravskoslezském kraji“, 30. listopad 2021, <https://www.veolia.cz/cs/media/novinky/veolia-vs-b-tuo-budou-spolecne-rozvijet-vyuziti-vodik-u-v-moravskoslezskem-kraji>.

energie, který dostatečně splňuje prahovou hodnotu 70 % snížení emisí skleníkových plynů oproti referenčnímu parnímu reformování zemního plynu. Maximální emisní stopa nízkouhlíkového vodíku nesmí překročit 3,38 kg CO₂ na 1 kg vodíku.

Přestože definice bude důležitým aspektem rozvoje výroby nízkouhlíkového vodíku, Evropská komise také ve směrnici navrhuje vytvořit metodologii výpočtu úspory emisí, tu ale plánuje vydat až ke konci roku 2024. Z řady vyjádření nadnárodní asociace *Hydrogen Europe*, ale vyplývá, že evropský průmysl plánující vodíkové projekty potřebuje definici a metodologii výpočtu mnohem dříve, a to i s ohledem na plánované cíle, které jsou obsaženy ve strategii *REPowerEU*.

Směrnice bude kromě jiného od provozovatelů přepravních soustav vyžadovat zveřejnění plánu rozvoje přepravní soustavy na 10 let dopředu, kterou budou aktualizovat každé 2 roky. Cílem takového opatření je docílit tzv. „*sector coupling*“^[134], kdy dojde k provázání budoucí vodíkové s elektrizační soustavou tak, aby jedna podporovala druhou a obráceně.

Nařízení o vnitřním trhu s obnovitelnými plyny, zemním plynem a vodíkem počítá s nízkouhlíkovým vodíkem zejména do roku 2030, do budoucna by i nízkouhlíkový vodík měl na trhu být nahrazován vodíkem obnovitelným. Dle návrhu Komise bude klíčové pro společnosti provozující přepravní soustavu umožnit úroveň mixu do 5 % na propojovacích bodech, a to od 1. října 2025. Nařízení také stanovuje novou platformu pro komunikaci provozovatelů přepravních soustav, která se nazývá ENNOH^[135]. Platforma ENNOH^[136] by měla spolupracovat na desetiletých plánech rozvoje přepravní infrastruktury a spolupracovat s dalšími platformami, jakými je například ENTSO pro elektřinu a plyn.

Důležitým bodem legislativy je, že Komise prozatím počítá s tím, že provozovatelé vodíkové infrastruktury budou oddělení od té se zemním plynem. Ze stanovisek řady asociací operujících na trhu se zemním plynem je ale zjevné, že takto nastavené regulační prostředí není pro tyto subjekty vyhovující. Je tedy pravděpodobné, že se řada pravidel ve finální podobě legislativy změní tak, aby lépe reflektovala rozvoj vodíkové infrastruktury navázané na infrastrukturu pro zemní plyn.

Evropská komise vydala balíček v prosinci 2021, lze tedy očekávat, že jeho projednávání v trialogu bude zpožděno oproti balíčku „*Fit for 55*“. V době vydání této cestovní mapy již probíhají trialogy a jsou známá stanoviska Rady Evropské unie z března 2023 a Evropského parlamentu z února 2023^[137]. Do budoucna lze nicméně za předpokladu plnění cílů *REPowerEU* očekávat, že rozvoj vodíkové infrastruktury bude muset být výrazně rychlejší než jak jej samotný balíček nastiňuje.

[134] Propojování elektrizační soustavy s plynovou.

[135] Evropská komise, *Nařízení o vnitřním trhu s plyny z obnovitelných zdrojů, se zemním plynem a s vodíkem (2021)*, https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:0c903f5a-5d8b-11ec-9c6c-01aa75ed71a1.0008.02/DOC_1&format=PDF.

[136] Platforma ENNOH je zkratkou pro Evropskou síť provozovatelů vodíkových sítí.

[137] Rada Evropské unie, *Gas Package: Member states set their position on future gas and hydrogen market*, 28. března 2023, <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/03/28/gas-package-member-states-set-their-position-on-future-gas-and-hydrogen-market/>

6. Potenciál vodíkového hospodářství v jednotlivých sektorech ve světě a v České republice

Primární hnací silou rozvoje vodíkového hospodářství je snaha snižovat emise skleníkových plynů, a to zejména v sektorech, ve kterých neexistuje mnoho jiných technologicky, či ekonomicky dostupných variant. Podle IEA dosáhla spotřeba vodíku celosvětově 94 milionů tun v roce 2021^[138]. Hlavním důvodem byla zvýšená poptávka po tradičních využitích vodíku, a to zejména v oblasti rafinace ropných produktů a v chemickém průmyslu. Většina vodíku se v současné chvíli ve světě vyrábí z fosilních zdrojů, přičemž nejčastějším zdrojem je zemní plyn^[139]. Současná výroba vodíku, která je z většiny zajištěna buďto parním reformováním zemního plynu, parciální oxidací ropných zbytků, nebo zplynováním uhlí je samotná součástí problému emisí skleníkových plynů a bude tak do budoucna vyžadovat, aby se od ní ustoupilo.^[140]

Príslibem dekarbonizace průmyslu, energetiky a sektoru dopravy je především rozvoj výroby obnovitelného a nízkouhlíkového vodíku, a to v co nejkratším možném časovém horizontu. IEA vypracovala v poslední aktualizaci k říjnu 2022 databázi většiny oznámených vodíkových projektů.^[141] Pokud by projekty, u kterých ale ve většině schází konečné investiční rozhodnutí, byly realizovány, výroba nízkouhlíkového a obnovitelného vodíku by se v roce 2030 mohla pohybovat mezi 16–24 miliony tun a instalovaný výkon elektrolyzérů by se pohyboval v rozmezí 134–240 GW. Sektor výroby vodíku bude muset projít do roku 2050 signifikantní změnou, aby došlo k naplnění cíle dosáhnout uhlíkové neutrality.

V souvislosti s vodíkovým hospodářstvím se do budoucna hovoří o využití vodíku zejména v sektorech dopravy, konkrétně nákladní, případně železniční, letecké a lodní. V oblasti energetiky se předpokládá, že vodík dopomůže překlenout období nízké výroby obnovitelných zdrojů a vysoké spotřeby. Sezónní akumulace bude hrát roli obzvláště v energetických systémech, které budou většinou založené na obnovitelných zdrojích energie^[142]. V chemickém průmyslu se očekává postupný přechod k obnovitelnému i nízkouhlíkovému vodíku u výroby čpavku, který je základem kamenem civilizace^[143]. Podobně by tomu mělo být i u výroby methanolu. Naopak sektor rafinace by měl zaznamenávat propad výroby s postupným odklonem od fosilních paliv^[144]. Naproti tomu výroba oceli byla celou řadou studií identifikována jako jeden z největších odběratelů vodíku do budoucna^[145]. V souvislosti s průmyslem se také často hovoří o vysokoteplotních aplikacích, kde by vodík také mohl nalézt své uplatnění. Další možné aplikace vodíku a odlišnosti v projekcích jejich uplatnění lze nalézt v řadě studií. Predikce se liší zejména v závislosti na tom, kdo studii zpracovává. V konečném důsledku, ale o úspěchu vodíku i v sektorech, kde existuje jiná nízkouhlíková alternativa, rozhodne hlavně konkurenceschopnost vodíku k přímé elektrifikaci a na to navázané limity přenosových soustav, cena materiálů a jejich dostupnost v daném místě a čase a geopolitická situace, která má potenciál značně ovlivnit celosvětový trh.

[138] Mezinárodní agentura pro energii, *Global Hydrogen Review 2022*, <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022/executive-summary>.

[139] Mezinárodní agentura pro energii, *Global Hydrogen Review 2021*, <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>.

[140] Hydrogen Council, *Hydrogen for Net-Zero A critical cost-competitive energy vector*, <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/11/Hydrogen-for-Net-Zero.pdf>.

[141] Mezinárodní agentura pro energii, *Global Hydrogen Review 2022*, <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022/executive-summary>.

[142] Ahmed M. Elberry, Jagruti Thakur a Jason Veysey, „Seasonal hydrogen storage for sustainable renewable energy integration in the electricity sector: A case study of Finland“, *Journal of Energy Storage*, 2021, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X21011580>.

[143] Vaclav Smil, *How the world really works* (United Kingdom: Penguin Random House UK, 2022).

[144] Mezinárodní agentura pro energii, *Net Zero by 2050*, 2021, <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.

[145] Agora Energiewende, No Regret Hydrogen, *Charting early steps for H2 infrastructure in Europe*, 2021, <https://www.agora-energiewende.de/en/publications/no-regret-hydrogen/>.

6.1 Výroba vodíku v ČR

Vodíková strategie České republiky předpokládá, že se Česká republika v příští dekádě stane importérem nízkouhlíkového a obnovitelného vodíku, a to z důvodu méně optimálních podmínek pro výrobu z obnovitelných zdrojů energie v porovnání s některými sousedními státy^[146]. Pro úspěšný rozvoj vodíkového hospodářství v oblastech mimo současné využití je klíčové dosáhnout co nejnižší možné ceny nízkouhlíkového a obnovitelného vodíku. Z odborné literatury a řady analýz zaměřených na výrobu obnovitelného vodíku vyplývá, že cena obnovitelného vodíku klesá s vyšším využitím elektrolyzátorů^[147]. Rozdíl v ceně při přepočtu na 1 kg se přestává výrazně měnit až při koeficientu využití, který se rovná více jak 50 %^[148]. Výsledná cena vodíku je navíc z více jak 60 % odvislá od ceny elektrické energie, kterou elektrolyzátor spotřebovává. Realita výroby vodíku v ČR bude vzhledem k přírodním podmínkám silně ovlivněna legislativním nastavením a možnostmi využívat zelenou elektřinu z elektrizační soustavy i pokud nebude zdroj zelené elektřiny v danou hodinu vyrábět. Pro průmysl je navíc klíčové mít k dispozici trvalý zdroj vodíku. Pokud by elektrolyzátor vyráběl jen v závislosti na tom, zda v danou chvíli svítí slunce, nebo fouká vítr, dodávky a tím i stabilita výroby navazujících produktů by mohly být ohroženy.

Obecně lze předpokládat, že pro ekonomicky optimální výrobu obnovitelného vodíku je nejefektivnější využit kombinaci větrné, vodní a solární elektřiny. Oba tyto zdroje se často doplňují. Například analýza společnosti *Aurora Energy Research* z února 2022 uvádí, že průměrná cena vodíku v 8 analyzovaných zemích (Norsko, Švédsko, Velká Británie, Itálie, Německo, Nizozemsko, Francie a Španělsko) by se měla v roce 2030 v závislosti na režimu fungování elektrolyzátorů pohybovat mezi 3–4 € za 1 kg vodíku^[149]. Potenciálem pro další snižování ceny výroby tohoto typu vodíku do budoucna i v České republice je sestupný trend cen, a to jak alkalických, tak PEM a vysokoteplotních elektrolyzátorů^[150].

Vodíková strategie České republiky předpokládá u vodíku několik stupňů cenové parity. Pro srovnání s naftou by cena nízkouhlíkového vodíku v České republice měla dosáhnout asi 4 €/kg na výdeji v co nejbližší době. Ve světle energetické krize je, ale tato varianta spíše nepravděpodobná a vychází z dřívějších cen pohonných paliv a zemního plynu. Například studie *International Council on Clean Transportation* ze září 2022 udává, že parity stejných nákladů na provoz v porovnání s diesellovými nákladními vozy lze dosáhnout u vodíku v případě, že se cena vodíku na pumpě bude pohybovat okolo 4 €/kg^[151]. Důležitou položkou pro vodík jako palivo je také otázka ceny skladování a distribuce, výsledná výrobní cena vodíku tak musí být výrazně nižší a lze předpokládat, že nejlépe budou ekonomicky vycházet ty projekty, kde bude alokována spotřeba blízko výroby vodíku. Posledním důležitým aspektem ceny vodíku je otázka technologické vyspělosti vodíkových technologií. V budoucnu lze očekávat, že technologické limity na straně přímé elektrifikace mohou v konečném důsledku podpořit rozvoj vodíkových aplikací, a to včetně budování vodíkové přepravní sítě. Například v případě bateriové elektromobility může a nemusí být reálně možné dosáhnout vhodných vlastností nákladních automobilů pro potřeby dopravců, tj. rychlost plnění paliva a dostatečný dojezd za každých podmínek. V tomto případě by pak cena vodíku mohla být i vyšší v porovnání s naftou, pokud k ní nebude existovat žádná ekonomicky a technologicky vyspělejší nízká či bezemisní varianta a pokud dojde k zdražení fosilních paliv vlivem politických rozhodnutí (emisní povolenky).

[146] Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky, *Vodíková strategie České republiky*, 2021, https://www.hytep.cz/images/dokumenty-ke-stazeni/Vodikova-strategie_CZ_G_2021-26-07.pdf.

[147] Fraunhofer Institute, *Cost Forecast for Low Temperature Electrolysis – Technology Driven Bottom-up Prognosis for PEM and Alkaline Water Electrolysis Systems*, 2021, <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/cost-forecast-for-low-temperature-electrolysis.pdf>.

[148] Lazard, *Lazards Levelized Cost of Hydrogen Analysis – Version 2.0*, 2021, <https://www.lazard.com/media/451895/lazards-levelized-cost-of-hydrogen-analysis-version-20-vf.pdf>.

[149] Aurora Energy Research, *Shades of green (hydrogen) – part 2: in pursuit of 2 EUR/kg*, 2022, <https://auroraer.com/insight/shades-of-green-hydrogen-part-2-in-pursuit-of-2-eur/kg/>

[150] Fraunhofer Institute, *Cost Forecast for Low Temperature Electrolysis – Technology Driven Bottom-up Prognosis for PEM and Alkaline Water Electrolysis Systems*, 2021, <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/cost-forecast-for-low-temperature-electrolysis.pdf>.

[151] The International Council on Clean Transportation, *Fuel-Cell Hydrogen Long-Haul Trucks in Europe: A Total Cost of Ownership Analysis*, 2022, <https://theicct.org/publication/eu-hvs-fuels-evs-fuel-cell-hdvs-europe-sep22/>.

Česká republika nemá ve výrobě obnovitelného nebo nízkouhlíkového vodíku stanovené platné cíle, které by se snažila aktivně naplnit, přestože se o výrobě vodíku hovoří ve Vodíkové strategii ČR. Většina vodíku v České republice je vyráběna v chemických provozech, kde je vodík integrální součástí dalších procesů vedoucí k produkci finálních produktů. Vodík, který je v těchto provozech vyráběn nemá dostatečnou čistotu k tomu, aby mohl být využit přímo v palivových článcích. I z toho důvodu je potřeba jej dočistovat na požadovanou úroveň pro další využití. Potenciál této výroby tkví především v ceně vyráběného vodíku, která je například pro vodík vyráběný z ropných zbytků relativně nízká, problémem je integrace vodíku do systému výroby fosilních paliv a jeho dočišťování na požadovanou úroveň.

Nízkouhlíkový vodík je v dočasné definici vodík, který je vyráběný, zatímco jeho emisní stopa není vyšší než 3,38 kg CO₂ na 1 kg vodíku a je vyráběn jen z neobnovitelných zdrojů. Výrobu nízkouhlíkového vodíku lze realizovat za pomoci technologie CCS/CCU^[152]. Technologie CCS a CCU ale potřebují v České republice do budoucna dostatečně robustní výzkum ohledně možností ukládání CO₂. Výsledky výzkumu ale budou dostupné až v delším časovém horizontu^[153]. Alternativním zdrojem výroby nízkouhlíkového vodíku by mohlo být využití elektrické energie produkované v jaderných elektrárnách, a to v kombinaci vysokoteplotní elektrolyzou vody, která využije stabilní odpadní teplo a výrobu elektřiny dané jaderné elektrárny k výrobě vodíku s elektrickou účinností dosahující až 84 %^[154]. K tomu, zda jsou současné jaderné elektrárny Temelín a Dukovany vhodné k integraci výroby vodíku je ale nutné provést vhodnou studii. Alternativou může být využití malých modulárních reaktorů, které ve svém návrhu již s integrací výroby vodíku počítají. Česká republika může podpořit výrobu nízkouhlíkového vodíku v návaznosti na schválená pravidla na unijní úrovni. Například v současné chvíli by výroba nízkouhlíkového vodíku z kombinace elektřiny vyrobené ve fotovoltaické elektrárně a elektrické energie vyráběné v kombinované výrobě elektřiny a tepla z biomasy, nemohla být uznána za nízkouhlíkový vodík.

Protože unijní legislativa upřednostňuje využívání obnovitelného vodíku je pro konkurenceschopnost obnovitelného vodíku vyráběného v ČR nutné zajistit jeho dostatečnou dotační podpory, a to ideálně v kombinaci investiční a provozní podpory. Pokud by byla podpora zajištěna, lze očekávat rozvoj obnovitelného vodíku na území České republiky ještě v průběhu této dekády, pokud ale podpora nebude dostatečná, lze očekávat nástup využívání obnovitelného vodíku až v příští dekádě, a to kvůli postupnému zvyšování importu přepravní soustavou. Aby navíc bylo možné obnovitelný vodík v České republice vyrábět, je nutné výrazně urychlit výstavbu jak fotovoltaických panelů, tak větrných elektráren.

6.2 Sektor chemického průmyslu

Sektor chemického průmyslu je jednou z oblastí, kde probíhá masivní využívání vodíku již v současnosti. Podle dat IEA bylo v roce 2021 celosvětově spotřebováno 94 milionů tun vodíku. Z toho 41 milionů tun spotřeboval sektor rafinace ropy, 34 milionů tun bylo využito pro výrobu amoniaku, 15 milionů tun pro výrobu methanolu a 5 milionů tun k přímé redukci železné rudy v sektorech ocelářství (v kombinaci s dalšími plyny). V podstatě veškerý vyrobený vodík pocházel z fosilních zdrojů, kterými je zemní plyn, ropa nebo uhlí^[155].

Vzhledem k elektrifikaci silniční dopravy lze do budoucna očekávat postupný pokles spotřeby vodíku v sektoru rafinace. Naproti tomu výroba čpavku a methanolu, včetně dalších navazujících chemických látek, bude nezbytná i nadále. Pro tyto aplikace neexistuje jiná nízkoemisní alternativa výroby. V sektorech výroby amoniaku a methanolu dojde k postupnému přechodu z využívání fosilních zdrojů na výrobu vodíku k využívání obnovitelných zdrojů. V Evropě existuje již řada projektů, které cílí na exportu obnovitelného a nízkouhlíkového amoniaku, jmenovitě

[152] Carbon Capture and Storage a Carbon Capture and Utilisation, ukládání oxidu uhličitého a jeho následné případné využití.

[153] Think Visegrad, *Policy Paper: Potential for CCS in V4 – will we seize the momentum?*, říjen 2021, <https://www.europeum.org/data/articles/hruby-visegrad.pdf>.

[154] Fuelcellsworld, „Sunfire Successfully Tests the World's Largest High-Temperature Electrolysis Module“, 5. května 2021, <https://fuelcellsworld.com/news/sunfire-successfully-tests-the-worlds-largest-high-temperature-electrolysis-module/>.

[155] Mezinárodní agentura pro energii, *Global Hydrogen Review 2022*, <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022/executive-summary>.

například projekt *Green Wolverine* ve Švédsku, nebo *Catalina Project* ve Španělsku. K výrobě 1 tuny amoniaku je potřeba asi 180 kilogramů vodíku^[156].

Předpokladem pro levnou výrobu amoniaku a na něj navázaných dusíkatých hnojiv je, ale nízká cena použitého vodíku a jeho stabilní dodávka. Energetická krize způsobená ruským vpádem na Ukrajinu v roce 2022 poukázala na realitu výroby dusíkatých hnojiv v Evropě, která je silně závislá na zemním plynu^[157]. Pro konkurenceschopnou výrobu amoniaku a dalších navazujících produktů je nezbytné zajistit levný zdroj energie pro výrobu vodíku. Potenciál výroby čpavku v České republice bude do budoucna omezený v závislosti na domácích kapacitách výroby obnovitelného a nízkouhlíkového vodíku. Do ceny výroby čpavku dále promluví cena přepravy vodíku, a tak lze očekávat, že první projekty na výrobu nízkouhlíkového a obnovitelného vodíku budou muset být umístěny poblíž míst, kde bude vyráběn samotný čpavek. Vybudování páteřní sítě plynovodů přepravujících vodík se očekává až v 30. letech tohoto století^[158]. Páteřní síť vodíkových plynovodů by ČR umožnila vyrábět konstantně čpavek i z obnovitelného vodíku, což by vedlo k významnému snížení emisí skleníkových plynů. Do konkurenceschopnosti výroby zeleného čpavku v České republice i v Evropské unii promluví import této komodity, u které se očekává masivní rozmach, a to zejména ze států s vhodnými přírodními podmínkami pro výrobu levné zelené elektřiny.

Výroba metanolu v Evropě je v současné chvíli z většiny zajišťována zemním plynem^[159]. Potenciál výroby methanolu z obnovitelného vodíku je velký. *Methanol Institute*, který reprezentuje metanolový průmysl od roku 1989 ve své studii k emisní náročnosti výroby methanolu uvádí, že při použití obnovitelného vodíku je míra snížení emisí skleníkových plynů v hodnotách od 90–100 %^[160]. Podobně jako v případě výroby amoniaku bude pro předpoklad výroby obnovitelného metanolu nutné zajistit levné dodávky obnovitelného vodíku. Metanol navíc potřebuje k výrobě dostupný zdroj oxidu uhličitého. Lze předpokládat, že transport oxidu uhličitého na dlouhé vzdálenosti potrubím, trailery nebo dalšími způsoby bude ekonomická výzva. Pro výstavbu metanolové výroby je tedy nutné zajistit v její blízkosti dodatečný zdroj oxidu uhličitého, který bude s velkou pravděpodobností postupně dostupnější díky výstavbě technologie zachytávání oxidu uhličitého. Využívání této technologie je zatím relativně nerozvinuté a menší množství projektů funguje v současné chvíli jen ve Spojených státech amerických, v Kanadě, v Norsku a Austrálii^[161]. Předpokladem pro úspěšné využití této technologie je, ale v blízkosti geologická struktura schopná plyn zachytávat.

Chemický sektor využívající vodík v České republice, který spadá pod průmysl definovaný v směrnici o obnovitelných zdrojích energie je zastoupen celkem 5 společnostmi. Největším výrobcem a zároveň i spotřebitelem vodíku je společnost Orlen Unipetrol, vodík využívá primárně k rafinaci ropných produktů a výrobě čpavku a je zodpovědná za více jak 80 tisíc tun vyrobeného vodíku z celkem 100 tisíc tun. Orlen Unipetrol je největším výrobcem čpavku na území České republiky, která ročně spotřebuje až 45 tisíc tun vodíku. Druhým největším výrobcem a spotřebitelem vodíku je společnost BorsodChem v Ostravě, která ročně vyrobí parním reformováním zemního plynu a spotřebuje přibližně 13 650 tun vodíku, a to primárně k výrobě anilínu. Třetím největším výrobcem je společnost Synthos Kralupy, která ročně vyrobí a spotřebuje přibližně 2 500 tun vodíku. Posledním velkým výrobcem, který vyrábí a spotřebovává přibližně 1 400 tun vodíku ročně k výrobě benzolu je společnost Deza ve Valašském Meziříčí. Relativně velkým spotřebitelem vodíku na území České republiky je společnost Lovochemie, která ale samotný čpavek dováží ze sesterské společnosti Duslo ze Slovenské republiky. Chemický průmysl stojí před výzvou nahradit dnes primárně vodík vyráběný buďto z ropných frakcí (Orlen Unipetrol), nebo zemního plynu (BorsodChem a Deza) či dehydrogenací ethylbenzenu (Synthos Kralupy) vodíkem obnovitelným. Jediným legislativně schůdným řešením v případě zachování výroby v místě

[156] Ibid.

[157] Bloomberg, „Europe’s Widening Fertilizer Crisis Threatens Food Supplies“, 25. srpna 2022, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-08-25/yara-to-further-cut-european-ammonia-production-due-to-gas-spike>.

[158] European Hydrogen Backbone, *European Hydrogen Backbone A European Hydrogen Infrastructure Vision Covering 28 Countries*, 2022, <https://ehb.eu/files/downloads/ehb-report-220428-17h00-interactive-1.pdf>.

[159] „The Methanol Industry“, oficiální stránka Methanol Institute, <https://www.methanol.org/the-methanol-industry/>.

[160] Methanol Institute, *Carbon Footprint of Methanol*, 2022 https://methanol.org/wpenginepowered.com/wp-content/uploads/2022/01/CARBON-FOOTPRINT-OF-METHANOL-PAPER_1-31-22.pdf.

[161] „Zachytávání CO₂“, Informační portál pro technologie zachytávání a ukládání CO₂, <http://www.geology.cz/ccs/technologie-ccs/zachytavani>.

spotřeby je výstavba elektrolyzérů v místě spotřeby samotných chemiček, ta se jeví jako nejjednodušší zejména tam, kde dnes dochází k výrobě parním reformováním zemního plynu za předpokladu, že navazující oxid uhličitý vzniklý z dané výroby není používán v areálu chemičky k dalším procesům. Podobně je nutné zhodnotit každý záměr pro výstavbu elektrolyzérů individuálně, a to z důvodu vysoké integrace výroby a spotřeby jednotlivých chemických látek k výrobě dalších látek v areálu chemiček. Chemický sektor bude do budoucna stát vzhledem k unijní legislativě (sektorové cíle pro vodík a zvyšující se cena emisních povolenek) a tlaku finančního sektoru (ESG) před výzvou zajištění výroby zelených chemikálií. Za předpokladu, že zelená výroba masivně neprodrazí výsledné produkty, může vést přechod k obnovitelnému vodíku v konečném důsledku k zvýšení konkurenceschopnosti prostřednictvím parametru udržitelnosti.

6.3 Sektor ocelářství

Sektor ocelářství je jedním z největších emitentů skleníkových plynů na planetě Zemi, zodpovědný za více jak 7–9 % emisí skleníkových plynů.^[162] Do současnosti je asi 70 % výroby závislých na uhlí a technologii vysokých pecí.^[163] Využití této technologie by, ale dle scénářů spoléhajících na snižování emisí skleníkových plynů mělo do budoucna klesat. Ocelářský průmysl v Evropské unii stojí před výzvou elektrifikace. Podle *Hydrogen Europe* by přechod ocelářského průmyslu v Evropské unii na přímou redukci železné rudy vodíkem a využití obloukových pecí znamenal poptávku po asi 5,3 milionech tun obnovitelného vodíku, což se rovná asi 370 TWh elektrické energie^[164]. Použití vodíku k přímé redukci železné rudy může vést k snížení emisí skleníkových plynů až o 100 %^[165]. Jednou z dalších možností kromě přímé redukce železné rudy vodíkem je zachování technologie vysokých pecí a využití vodíku k získávání tepla. *Hydrogen Europe* předpokládá, že výroba 4 milionů tun oceli pomocí technologie přímé redukce železné rudy by si vyžádala asi 204 tisíc tun obnovitelného vodíku ročně, a to za předpokladu použití asi 51 kg vodíku na redukci 1 tuny železné rudy. Při vysokém využití elektrolyzérů až na úrovni 8 000 hodin ročně by si výroba 4 milionů tun oceli vyžádala asi 1,3 GW výkonu elektrolyzérů.

Ocelářská unie České republiky podotýká, že přechod na přímou redukci železné rudy vodíkem společně s využitím obloukových pecí by znamenalo jen v České republice dodatečnou poptávku po asi 20 TWh elektrické energie.^[166] V České republice se v době vydání této cestovní mapy nacházejí dvě funkční ocelárny, které jsou lokalizovány v Moravskoslezském kraji, jedná se o ocelárny LIBERTY Ostrava a Třinecké železářny. Celkem tyto ocelárny ročně vyrobí od 4 do 5 milionů tun oceli.^[167] Pro dekarbonizaci ocelářského průmyslu v České republice bude v budoucnu nutné využít buďto technologii zachytávání oxidu uhličitého, nebo přejít na cestu využívání vodíku a přechodu k obloukovým pecím. Alternativní technologií, která je, ale dnes ve stavu nižší technické vyspělosti než použití vodíku jako přímého redukčního činidla, je produkce železa a kyslíku přímou elektrochemickou redukcí oxidů v iontových taveninách (Molten Oxide Electrolysis)^[168].

Do budoucna lze očekávat zvyšující poptávku po oceli, která byla vyrobena s nižší emisní stopou než v případě běžných způsobů výroby. Kromě konkurenceschopnosti bude nutné otázkou přechodu na šetrnější způsoby výroby

[162] Jinsoo Kim, Behjamin K. Savacool a další, „Decarbonising the iron and steel industry: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations“, and policy options, Energy Research & Social Science, 2022, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214629622000706>.

[163] Mezinárodní agentura pro energii, *Iron and Steel*, 2022 <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel>.

[164] Hydrogen Europe Research, *Steel from Solar Energy A Techno-Economic Assessment of Green Steel Manufacturing*, 2022, https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2022/06/Steel_from_Solar_Energy_Report_05-2022_DIGITAL.pdf.

[165] Ibid.

[166] Odborové organizace ocelářského průmyslu z České republiky, Polska a Slovenska, „Společná deklarace zástupců ocelářského průmyslu“, 26. listopadu 2021, <https://odbory.cz/?p=2594>.

[167] Hydrogen Europe Research, *Steel from Solar Energy A Techno-Economic Assessment of Green Steel Manufacturing*, 2022, https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2022/06/Steel_from_Solar_Energy_Report_05-2022_DIGITAL.pdf.

[168] Pavel Raška, Šárka Langová, Juraj Leško, „Možnosti produkce železa a kyslíku přímou elektrochemickou redukcí oxidů v iontových taveninách“, Chemické listy 108, 2014, <https://adoc.pub/monosti-produkce-eleza-a-kysliku-pimou-elektrochemickou-redu.html>.

řešit v kontextu postupného snižování množství emisních povolenek v rámci systému EU ETS, pod které ocelárny spadají. Kompletní přechod ocelářského sektoru na nízkouhlíkový, potažmo obnovitelný vodík by si v ČR vyžádal trvalý zdroj vodíku, případně jeho import ze sousedních zemí. Podobně jako v případě chemického sektoru bude pro úspěšný přechod nutné zajistit stabilní a levnou dodávku obnovitelného či nízkouhlíkového vodíku, a především zelené elektřiny. Jistou alternativou je výroba ocelových produktů v obloukových pecích z železného šrotu a tím úplné obejítí problému s nedostatkem vodíku na výrobu železa prostřednictvím přímé redukce železné rudy.

6.4 Sektor dopravy

Rozvoj vodíkové mobility je třaskavým tématem napříč jak politickou, odbornou, tak veřejnou sférou. Vodík lze považovat za jedno z potenciálních paliv v sektorech silniční, železniční, letecké a námořní dopravy, a to zejména z důvodu snižování emisí skleníkových plynů. Výhodou vodíkových automobilů je vyšší dojezd napříč všemi sektory dopravy v porovnání s dalšími lokálně bezemisními způsoby ukládání elektrické energie, jakými jsou především baterie. Vodík je pro své chemické vlastnosti v automobilech nutné skladovat buďto ve formě stlačeného vodíku na 350, případně 700 bar, nebo ve formě kapaliny. Průměrné osobní vozidlo v roce 2022 na vodík je schopno při 700 barech uskladnit od 5,6 do 6,3 kg vodíku v nádržích o objemu až 156 litrů. Průměrný osobní automobil na vodík má spotřebu přes 1 kg vodíku na 100 km^[169]. Výhodou vodíku oproti konkurenčním lokálně bezemisním technologiím je schopnost naplnit nádrž na 100 % do 5 minut. Přesto je, ale množství prodáváných vozů celosvětově relativně nízké, a to zejména kvůli malému výběru, kdy v současné chvíli na trzích v Evropské unii působí pouze značky Hyundai a Toyota. Problémem se jeví absence dostatečné infrastruktury pro plnění vodíkových vozů, které jsou zpočátku navíc zatíženy relativně vysokými investičními a provozními náklady v případě, že vozů v dané lokalitě jezdí malé množství. Protože množství prodaných bateriových elektromobilů v osobní dopravě roste a jejich vlastnosti se zlepšují, je na ujní úrovni vidět změna debaty v otázce využívání vodíku v osobní silniční dopravě, která více favorizuje přímou elektrifikaci^[170].

Přesto je ale primárním cílem rozvoje vodíkové mobility snižování emisí skleníkových plynů. Například analýza *International Council on Clean Transportation*, která se zaměřuje na otázku porovnání emisí skleníkových plynů v celém řetězci od výroby až po spotřebu u osobních automobilů ukazuje, že jedině při použití vodíku nebo baterií je možné výrazně snížit emise skleníkových plynů v průběhu života automobilu, a to už při využití výroby vodíku ze zemního plynu^[171]. Emisní náročnost vodíku vyrobeného parním reformingem zemního plynu je i při započtení úniků methanu na podobné úrovni jako použití automobilů spalujících CNG. Při použití vodíku obnovitelného je možné dosáhnout výrazně menšího množství vypuštěných emisí v průběhu života jednoho vozidla. Vlivem vyšší spotřeby elektrické energie v průběhu celého cyklu od výroby, přepravu, skladování až spotřebu vodíku v automobilu s palivovým článkem je celkové množství využití energie asi třikrát vyšší než v případě použití čistě bateriového elektromobilu^[172]. V případě použití obnovitelného vodíku jsou emise skleníkových plynů oproti automobilům spalujícím benzín nižší až o 76 %.

Předpokladem pro rozvoj vodíkové mobility, ať už v osobní, nebo nákladní silniční dopravě, je dostatečná infrastruktura pro plnění vodíkových automobilů. Národní akční plán čisté mobility z roku 2019 předpokládá do roku 2030 výstavbu až 80 plnicích stanic na vodík, a to hlavně pro osobní dopravu^[173]. Aktualizovaný akční plán ale v roce 2023 snížil počet plnicích stanic na 40 vzhledem k pomalejšímu než očekávanému rozvoji vodíkové mobility. Česká republika se přesto staví na stranu ambicióznějších států, které k otázce čisté mobility přistupují technologicky neutrálně

[169] Usporne.info, „Test: Hyundai Nexa FCEV – Skutečná spotřeba auta na vodík“, 24. ledna 2022, <https://www.usporne.info/12127-test-hyundai-nexo-fcev-skutecna-spotreba-auta-na-vodik/>.

[170] Euractiv, „2 billion euro, Clean Hydrogen Partnership' signals move away from hydrogen cars“, 2. prosince 2021, <https://www.euractiv.com/section/energy/news/e2-billion-clean-hydrogen-partnership-another-move-away-from-hydrogen-cars/>.

[171] The International Council on Clean Transportation, *A Global Comparison of the Life-Cycle Emissions of Combustion Engine and Electric Passenger Cars, 2021*, <https://theicct.org/publication/a-global-comparison-of-the-life-cycle-greenhouse-gas-emissions-of-combustion-engine-and-electric-passenger-cars/>.

[172] Ibid.

[173] Ministerstvo dopravy, *Aktualizace Národního akčního plánu čisté mobility*, 2019, <https://www.hytep.cz/images/dokumenty-ke-stazeni/Aktualizace-NAP-CM.pdf>.

a s vodíkem v mobilitě počítají. Ekonomicky nejnashodnějším postupem v otázce výstavby infrastruktury je možnost stavět plnicí stanice v místech vysokého multimodálního provozu, kde je umožněno na jednom místě plnění vícero zařízení, od osobní až po nákladní nebo železniční dopravu. Vodík má největší potenciál zejména tam, kde je nutné vozidla používat nepřetržitě, to platí jak pro lehčí užitkové vozy, taxi služby, nebo dálkové nákladní automobily. Tyto místa by měla vznikat co nejbliže výrobnám vodíku, aby bylo možné maximálně snížit náklady na přepravu vodíku.

V letech 2020–2021 bylo v EU registrováno 1 762 nových osobních vozidel s palivovými články a do konce roku 2021 otevřeno 147 veřejných plnicích stanic^[174]. V červnu 2023 byly v České republice otevřeny celkem 2 neveřejné plnicí stanice v Ostravě a Mstěticích u Prahy a 2 veřejné plnicí stanice na pražském Barrandově a v Litvínově. Výstavba plnicích stanic v ČR, ale zažívá skluz, a to zejména kvůli komplikacím v rámci dodavatelských řetězců. Tyto problémy ale nejsou ojedinělé ani jinde ve světě^[175]. Vodíkových osobních automobilů bylo v ČR zaregistrováno do června 2023 celkem 24^[176]. Potenciál do budoucna nicméně nabízí zejména segment těžké nákladní a lehkých či středně velkých užitkových vozidel, například koncern Stellantis plánuje od roku 2024 vyrábět sériově asi 5000 lehkých užitkových vozidel využívající palivový článek jako prodlužovač dojezdu ročně^[177]. Podobně francouzská automobilka Renault ve společném podniku HYVIA se společností Plug Power plánuje v příštích letech sériovou produkci velkých dodávek s dojezdem až 500 km^[178]. Podobná je situace i v oblasti nákladní dopravy, kde většina automobilek plánuje nabízet i vodíkové alternativy k bateriovým protějškům s dojezdy většinou okolo 800 a více kilometrů, jedná se o značky Daimler, Scania, Volvo Trucks, Nikola, Hyzon Motors, Iveco a další.

Realizovat vodíkovou mobilitu napříč všemi významnými sektory, ale půjde jedině v případě dostatečně husté plnicí infrastruktury napříč Evropou. Klíčové bude zajistit dostatek plnicích stanic na sítích TEN-T a ve velkých městech. Jakmile bude k dispozici robustní infrastruktura lze očekávat zrychlený rozvoj vodíkové mobility.

6.5 Sektor energetiky

Debata o roli vodíku v sektoru energetiky je založena na fyzikálních vlastnostech molekul, které je možné skladovat v dlouhodobějším horizontu a ve větších objemech. Vodík bude komplementárním řešením k zajištění celoročních dodávek elektřiny prostřednictvím akumulace elektrické energie. Tento předpoklad, ale může být naplněn jen ve specifickém případě a zejména v energetických systémech, ve kterých hrají hlavní roli obnovitelné zdroje energie. Předpoklad vychází ze systému, ve kterém je nainstalováno velké množství výkonu obnovitelných zdrojů energie, který nelze flexibilně ovládat, a který je odvislý od vnějších vlivů. V případě přebytků v elektrizační soustavě nabízí vodík možnost akumulace elektrické energie, pro kterou v daný moment není poptávka, případně jí elektrizační soustava není schopná dopravit na místo využití. Jedná se o technologie *Power-To-Hydrogen*.

Rychlost, jakou se dané technologie rozvinou, bude záležet na několika proměnných, zejména ale množství instalovaného výkonu elektrolyzérů. Například studie Evropské sítě provozovatelů přenosových soustav elektřiny dochází k závěru, že elektrolyzéry mohou sehrát roli v zamezování omezení dodávek elektrické energie do sítě již v roce

[174] Centrum Dopravního Výzkumu, *Rozvoj vodíku v silniční dopravě v České republice a Evropské unii*, 2022, <https://silnice-zeleznice.cz/silnice/rozvoj-vodik-u-silnicni-doprave-v-ceske-republice-a-evropske-unii-723>.

[175] „2022 Evaluation of FCEV Deployment and H2 Station Network Development“, oficiální stránka Hydrogen Fuel Cell Partnership, 2022, <https://h2fc.org/content/ab8-webinar-2022-evaluation-fcev-deployment-and-h2-station-network-development>.

[176] „Registrace všech čistých vozidel v ČR dle NAP ČR“, oficiální stránka Centra Dopravního Výzkumu, 2023, <https://www.cistadoprava.cz/registrace-vsech-cistych-vozidel-v-cr-dle-nap-cm/>.

[177] Stellantis, „Stellantis Hordain: First Plant in the World to Produce Hydrogen-powered Electric and Combustion Engine Commercial Vehicles“, 27. října 2022, <https://www.stellantis.com/en/news/press-releases/2022/october/stellantis-hordain-first-plant-in-the-world-to-produce-hydrogen-powered-electric-and-combustion-engine-commercial-vehicles>.

[178] Green Car Congress, „Hyvia unveils the production version of Master Van H2-Tech“, 17. října 2022, - <https://www.greencarcongress.com/2022/10/20221017-hyvia.html>.

2030, a to v kombinaci s velkým potenciálem Evropy pro skladování vodíku v podzemních skladovacích zařízeních^[179]. Problémem nicméně je, že tato podzemní skladovací zařízení, zejména v podobě solných jeskyň, nejsou dostupná napříč celou Evropou, ale jen v určitých oblastech (Německo, Polsko) a zejména pod mořem^[180]. K využití vodíku v sektoru energetiky je také nutné připočítat značné ztráty ke kterým dochází při zpětné výrobě elektrické energie v palivových člancích, nebo plynových turbínách, kdy cyklus od výroby vodíku, až po zpětnou výrobu elektrické energie dosahuje celkové účinnosti mezi 22–29 %^[181]. Výhodou využití elektrolyzátoru, a to zejména PEM, je také možnost poskytovat provozovatelům přenosových soustav služby výkonového rovnováhy.

S postupnou elektrifikací řady oblastí je více než pravděpodobné, že elektrizační soustava bude muset být signifikantně posílena. Kromě závislosti na jednom systému se nabízí v energetice otázka integrace vodíku do současných plynovodních sítí, a to jak přepravních, tak distribučních. Pro úspěšný rozvoj vodíkového hospodářství bude výstavba a předělání plynovodů přepravujících a distribuujících zemní plyn na vodík a jeho následné skladování klíčové kvůli ekonomice distribuce. Distribuční společnost GasNet například ve své tiskové zprávě uvádí, že jejich distribuční soustava je z více jak 60 % připravena na dodávky vodíku^[182]. Připravenost vychází z reality postupného předělávání ocelových potrubí na polyethylenová, které jsou schopná vodík přepravovat. I přes tento pozitivní vývoj je, ale nutné pro přepravu vodíku vyměnit jednotlivé armatury a kompresory, aby byla možná bezpečná distribuce vodíku v současných plynovodech, a to z důvodu fyzikálních vlastností vodíku. Kromě distribuce vodíku je důležitá i otázka mezinárodní přepravy. Té se na českém území věnuje plynárenská přepravní společnost NET4GAS, jež je součástí celoevropské iniciativy na přepravu vodíku nesoucí název *European Hydrogen Backbone*. Do iniciativy je zapojeno na 31 přepravních společností z celé Evropy, kteří očekávají, že v roce 2040 bude k dispozici v Evropě až 53 000 km nových a předělaných plynovodních sítí pro přepravu vodíku z center výroby do míst poptávky^[183]. Cena takto přepravovaného vodíku by se měla pro plynovody umístěné na zemi pohybovat v rozmezí 0,11 – 0,21 € za 1 kg vodíku na 1 000 km.^[184] Rychlost, výstavba a předělávání infrastruktury ale bude záležet na celé řadě faktorů, mimo jiné i konečné poptávce po zemním plynu. V současné chvíli provozovatel přepravní soustavy počítá s implementací samostatného plynovodu přepravující vodík kolem roku 2030, ten by měl mít denní kapacitu 144 GWh energie. Ten nese název Středoevropský vodíkový koridor a v době vydání této cestovní mapy má společnost NET4GAS zpracovanou před studii proveditelnosti. Cílem je realizace úpravy jižní části plynovodu na českém území mezi hraničními body Lanžhot a Waidhaus^[185]. Kromě propojení Lanžhotu a Waidhausu počítá projekt s úpravou západní části české přepravní soustavy v rámci iniciativy České-německého vodíkového propojení mezi body VIP Brandov a Waidhaus.

Vybudování plynovodní infrastruktury pro přepravu vodíku je v České republice nutnou prerekvizitou k rozvoji vodíkového hospodářství mimo vodíkové huby. Technickým omezením přepravy vodíku v plynné formě je mimo jiné nízká energetická hustota plynu při normální teplotě i tlaku, to si vyžádá v konečném důsledku vynaložení více energie na přepravu vodíku v porovnání se zemním plynem. Na českém trhu se začínají objevovat nové technologické postupy přepravy vodíku prostřednictvím vysokotlakých nádrží, schopných přepravit až 500 kg vodíku na korbě nákladního vozidla, v porovnání s přepravou fosilních paliv (i 26 tun benzínu) je ale takováto přeprava méně ekonomická^[186]. Alternativou je rozvážet vodík ve zkapalněné podobě s vyšší energetickou hustotou na objem,

[179] ENTSO-E, *Potential of P2H2 technologies to provide system services*, červen 2022, https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/clean-documents/Publications/Position%20papers%20and%20reports/ENTSO-E_Study_on_Flexibility_from_Power-to-Hydrogen_P2H2.pdf.

[180] Ibid.

[181] Antonio Escamilla, David Sánchez, Lourdes García-Rodríguez, „Assessment of Power-To-Power Renewable Energy Storage Based on the Smart Integration of Hydrogen and Micro Gas Turbine Technologies”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031992201388X>.

[182] GasNet, „GasNet je připraven zvedat podíl biometanu a vodíku ve své síti”, 24. května 2022, <https://www.gasnet.cz/o-spolocnosti/novinky/2022/05/GasNet-je-pripraven-zvedat-podil-biometanu-a-vodik>.

[183] European Hydrogen Backbone, *European Hydrogen Backbone A European Hydrogen Infrastructure Vision Covering 28 Countries*, 2022, <https://ehb.eu/files/downloads/ehb-report-220428-17h00-interactive-1.pdf>.

[184] Ibid.

[185] NET4GAS, *Desetiletý plán rozvoje přepravní soustavy v ČR*, 30. června 2023, https://www.net4gas.cz/files/rozvojove-plany/ntyndp24-33_cz_2023_230630_konzultace.pdf

[186] Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky, *Vodíková strategie České republiky*, 2021, https://www.hytep.cz/images/dokumenty-ke-stazeni/Vodikova-strategie_CZ_G_2021-26-07.pdf

to si ale vyžádá značné energetické ztráty a speciální materiály pro uskladnění vodíku při -253 stupních celsia (viz kapitola potenciálu vodíkových technologií). I z toho důvodu vychází přeprava vodíku plynovody na delší vzdálenosti v rámci samotné Evropy neekonomičtěji.

Role vodíku v energetice bude závislá na konkurenceschopnosti ostatních technologií pro dlouhodobé skladování energie, jakými je například systém s akumulací stlačeného vzduchu, redox-flow baterie nebo přečerpávací elektrárny. Rychlost nasazení vodíku pro sezónní skladování v České republice bude záviset na rozvoji obnovitelných zdrojů energie v celkovém energetickém mixu České republiky, které se v roce 2020 podílely na hrubé výrobě elektrické energie v ČR podílem asi 12,7 %^[187]. Potenciálu výroby vodíku k sezónnímu skladování se věnoval dokument platformy s názvem Technologický foresight a implementační akční plán využití vodíkových technologií v energetice a průmyslu ČR z roku 2020. Ten došel k závěru, že vyššímu uplatnění akumulace elektřiny do vodíku dojde až při signifikantním navýšení instalovaného výkonu jak fotovoltaických, tak větrných elektráren, který je předpokládán až k roku 2040^[188]. Výroba vodíku pro sezónní akumulaci může dosahovat přes 100 tisíc tun vodíku ročně za předpokladu nainstalovaných 5,5 GW elektrolyzérů společně s 21,5 GW fotovoltaických a 4,6 GW větrných zdrojů v referenčním modelu maximální OZE^[189]. Potenciál vodíku překlenout období „*dunkelflaute*“ známého z německého prostředí, kdy obnovitelné zdroje energie, obvykle v zimě, nemusí vyrábět celé týdny, půjde realizovat jen v případě masivního rozvoje obnovitelných zdrojů energie i v České republice a funkční přepravy vodíku z míst výroby do míst spotřeby.

Pokud by vodík měl nahradit do značné míry zemní plyn jako energetický nosič, bude nutné i na území České republiky zajistit jeho skladování. K tomu je potřeba vypracovat studii/e zkoumající, zda se vodík hodí pro skladování v podzemních zásobnících, jež jsou v současnosti využívány pro skladování zemního plynu. Jedná se především o podzemní porézní zásobníky vzniklé z vytěžených ložisek zemního plynu v Třanovicích, Štramberku, Dambořicích, Uhřicích, Tvrdonicích a Dolních Dunajovicích. Na území České republiky se nachází i jeden využívaný kavernový zásobník plynu vytvořený v žulovém masivu v Hájích a podzemní porézní zásobník (*aquifer*) v Lobodících.

[187] Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky, Obnovitelné zdroje v roce 2020, 2020, <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/obnovitelne-zdroje-energie/2021/9/Obnovitelne-zdroje-energie-2020.pdf>.

[188] Česká vodíková technologická platforma, *Technologický foresight a implementační plán využití vodíkových technologií v energetice a průmyslu ČR, 2020*, <https://www.hytep.cz/images/dokumenty-ke-stazeni/TF-a-IAP-vodik-v-energetice-a-prumyslu-CR.pdf>.

[189] Ibid.

7. Legislativní, technické a další výzvy v otázce rozvoje vodíkových aplikací v České republice

Úroveň technologické připravenosti technologií vodíkového hospodářství od výroby až po koncové využití se v současné chvíli pohybuje ve většině případů na hranici TRL 5-8^[190]. Množství integrovaných projektů^[191] spojující inovativní způsoby výroby společně s využitím vodíku v dopravě, nebo v průmyslu v Evropě roste. V České republice první pilotní projekty teprve vznikají. Současná výroba vodíku spadá do kategorie chemické výroby, kde je vodík především využit jako surovina pro další chemické procesy. Pro budoucí využití vodíku jako paliva v palivových článcích a dalších navazujících technologiích bude klíčový rozvoj výroby vodíku, případně dočištění vodíku na úroveň minimálně 99,97 % mixu plynu podle české technické normy ČSN ISO 14687^[192]. Další mezinárodní normy na výrobu, standardizaci terminologie, metod měření, analýzy, testování a další aspekty spojené s rozvojem vodíku v rámci vodíkového hospodářství by měly být k dispozici nejpozději ke konci roku 2024, a to v rámci technické skupiny ISO/TC 197^[193].

Rozvoj výroby a následného využití vodíku v současné chvíli trpí především tím, že vodík je v české legislativě vnímán pouze surovina pro chemickou výrobu. Chybí definice vodíku, jako energetického zdroje. Vodík není v české legislativě definován v zákoně č. 458/2000 Sb. – Zákon o podmínkách a podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích (energetický zákon) v oblasti plynárenství ani elektroenergetiky, a tak není pro energetické účely podporován^[194]. Do podzimu 2023 se nicméně očekává schválení revize energetického zákona Parlamentem ČR a Prezidentem ČR. Revize vkládá mezi definici plynu i vodík. Od začátku roku 2024 by tak vodík měl být vnímán legislativně plnohodnotně jako energetický plyn.

Vodík je v době vydání této cestovní mapy explicitně zmíněn pouze v zákonu č. 311/2006 Sb. tedy zákoně o pohonných hmotách a čerpacích stanicích pohonných hmot. Díky této zmínce lze vodík legislativně definovat jako palivo.

S postupnou přípravou a realizací vodíkových projektů napříč územím České republiky se začínají objevovat první komplikace, které vyplývají z nasazování nových technologií do praxe. Ze studie^[195], kterou si nechala Česká vodíková technologická platforma zpracovat společností PWC mezi členy České vodíkové technologické platformy i dalšími společnostmi, kteří se v současné chvíli nachází ve fázi realizace výstavby elektrolyzérů na území České republiky vyplývají tyto problematické body:

- 1) Povolení výroby vodíku pomocí elektrolyzy vody se řídí podle zákona č. 100/2001 Sb., o posuzování vlivů na životní prostředí a zákona č. 76/2002 Sb. o integrované prevenci znečištění, přičemž oba tyto zákony na výrobu vodíku pro energetické či dopravní účely nahlížejí jako na chemickou výrobu, nikoliv akumulaci energie, což komplikuje výstavbu elektrolyzérů vzhledem ke stavebnímu řízení (povolování) v České republice.
- 2) V případě překročení roční výroby 200 tun vodíku je nutné u každého projektu vypracovat posouzení vlivů na životní prostředí (zákon o EIA), roční výroba se počítá z výkonu zařízení, která nemá vliv na reálné využití elektrolyzérů (kapacitní faktor). V praxi se roční výroba 200 tun řídí nikoliv očekávanou výrobou vzhledem k využití elektrolyzérů, ale jeho maximálním výkonem. Problematické také může být samotné uskladnění vodíku o podobných ročních kapacitách okolo 200 tun, které s velkou pravděpodobností také musí postupovat zjišťovací řízení. Úřady navíc v rámci EIA přistupují k jednotlivým projektům napříč kraji odlišně. Předmětem posuzování jsou

[190] „Emerging Energy Technologies Fund – Hydrogen Innovation Scheme: Form and Guidance“, oficiální stránka skotské vlády, 2022, <https://www.gov.scot/publications/emerging-energy-technologies-fund-hydrogen-innovation-scheme-form-and-guidance/pages/technology-readiness-levels/>.

[191] Integrovaný projekt je inovativní typ podpory, který umožní zapojení většího množství aktérů k výstavbě a provozu celého vodíkového řešení. V praxi by takovýto projekt obsahoval jak výrobu, tak distribuci i koncové využití, kdy každý aktér bude mít slíbenou předem jasně definovanou formu financování. Takovéto projekty by pomohly překlenout základní problém vodíkového hospodářství, tedy problém vejce vs. slepice.

[192] „ČSN ISO 14687“, oficiální stránka pro technické normy ČSN, 2022, <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-iso-14687-656520-214575.html>

[193] „ISO/TC 197, Hydrogen Technologies“, oficiální stránka ISO, 2022, <https://www.iso.org/committee/54560.html>.

[194] „Zákon č. 458/2000 Sb.“, Zákony pro lidi, 2022, <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-458>.

[195] PWC, Případová studie výstavby elektrolyzérů v České republice, 15. března 2023,

záměry uvedené v příloze č. 1 zákona o EIA. Zatímco některé příslušné úřady použili položku 34 (výroba chemických látek a směsí a zpracování meziproductů od stanoveného limitu) a zařadili tak projekt do kategorie II (podléhá zjišťovacímu řízení) s místní příslušností krajského úřadu (kde je limit pro aplikaci zákona EIA při úrovni 200 tun vodíku ročně), jiné úřady aplikovaly položku 30 (integrování zařízení k průmyslově výrobě základních organických a anorganických látek a směsí s chemickou přeměnou) s místní příslušností Ministerstva životního prostředí a zařazení do kategorie I (kde není v rámci zákona o EIA žádný limit a projekt tak podléhá posuzování EIA). Další úřad navrhl využít položku 87 (skladování zemního plynu a jiných hořlavých plynů s objemem zásobního prostoru od stanoveného limitu) s místní příslušností krajského úřadu a spadající do kategorie II (potřeba zjišťovacího řízení) s limitem 10 tisíc m³/rok.

- 3) Pokud se jedná o výrobu vodíku pro komerční využití, a protože zákon nahlíží na výrobu vodíku elektrolýzou vody jako na chemickou výrobu je velmi pravděpodobné, že výroby vodíku budou muset podle zákona č. 76/2002 Sb. o integrované prevenci znečištění nuceni podstoupit proces integrovaného povolení, které stanovuje závazné podmínky provozu zařízení tak, aby jeho vliv na životní prostředí byl co nejmenší. V praxi si například jeden relevantní správní úřad na území České republiky vyložil výstavbu elektrolyzéry tak, že výroba spadá do kategorie chemického průmyslu, kde se výrobou rozumí výroba látek nebo skupin látek uvedených v bodech 4.1 až 4.6, kde je výslovně jmenován vodík (v jediné kategorii), který je ale zamýšlen v kontextu chemické výroby velkých chemických továren, nikoliv jakožto výroba energetického plynu. Zákon o IPPC by se měl nicméně v příštích letech měnit, Rada Evropské unie plánuje pro elektrolytickou výrobu vodíku z vody vložit výjimku pro projekty do 60 tun výroby denně. Ty by tedy následně nespádaly pod nutnost integrovaného povolení^[196].

Protože zákon elektrolytickou výrobu vodíku pro účely výroby paliva nebo akumulace energie nezná, je obecně na tento typ výroby nahlíženo jako na výrobu chemických látek. Pro decentralizovanou výrobu vodíku v kombinaci s obnovitelnými zdroji energie je, ale tento postup nedostačující. Vodík je sice výbušným a nebezpečným plynem, jeho vliv na životní prostředí v bezprostředním okolí by byl při úniku zanedbatelný. Vodík je nejlehčím plynným prvkem, který se při úniku rychle rozptýlí do okolí, protože je 14x lehčí než vzduch. Podobně relativně bezproblémová je v porovnání s dalšími industriálními procesy spotřeba vody^[197]. Na výrobu 1 kg vodíku je potřeba přes 9 litrů vody, komerčně nasazené elektrolyzéry ale mohou mít spotřebu o něco málo vyšší^[198].

Možným řešením v otázce vypracování EIA je vyčlenit výrobu elektrolýzou vody pro účely energetické a výroby paliva mimo výrobu chemických látek, a tam případně stanovit limit pro velké projekty o velikosti stovek MW.

[196] Rada Evropské unie, *Council reaches agreement on amendments to industrial emissions directive*, 16. březen 2023, <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/03/16/council-reaches-agreement-on-amendments-to-industrial-emissions-directive/>

[197] Energypost.eu, „Hydrogen production in 2050, how much water will 74 EJ Need“, 22. července 2021, <https://energypost.eu/hydrogen-production-in-2050-how-much-water-will-74ej-need/>.

[198] Water Management Solutions, *Water for the Hydrogen Economy*, 2020, https://watersmartsolutions.ca/wp-content/uploads/2020/12/Water-for-the-Hydrogen-Economy_WaterSMART-Whitepaper_November-2020.pdf.

8. Vzdělávání v oblasti vodíkových technologií

Základní podmínkou zavádění vodíkových technologií je zajištění dostatečného množství kvalifikovaného personálu na všech úrovních vzdělávání. Rámcové vzdělávací programy pouze definují témata a je na jednotlivých institucích, jak podrobně se budou danému tématu věnovat. To popisuje školní vzdělávací program. Vzhledem ke způsobu tvorby studijních programů je složení učebních osnov kompetencí samotných vzdělávacích institucích.

Nicméně tyto instituce si musí samy zajistit kvalifikované lektory a studijní materiály. To činí rozvoj vzdělávání ve vodíkových technologiích víceméně náhodné a závislé do značné míry na nadšení jednotlivců. Situace se v České republice pomalu začíná měnit na základě tlaku řady společností, které v rámci své spolupráce se vzdělávacími institucemi prosazují zavedení vodíkových technologií do výuky. Za vzorový případ lze považovat projekt podpory společnosti Orlen Unipetrol na středních školách v Ústeckém kraji, kde společnost financovala nákup modelů RC autíček poháněných vodíkem v soutěži *Horizon Hydrogen Grand Prix*^[199]. Cílem těchto akcí je podnítit zájem o studium technických věd se zaměřením na vodík. Obecně lze problematiku vzdělávání rozdělit podle stupňů vzdělání.

8.1 Základní školství

Na této úrovni je třeba aby žáci získali dostatečné všeobecné základy v oblasti matematiky, fyziky a chemie. Zároveň by měli obdržet základní informaci o existenci vodíkových technologií. Základním problémem na této úrovni je nedostatek kvalifikovaných pedagogů technických předmětů schopných dalšího vzdělávání. To je mimo jiné zapříčiněno nedostatečným platovým ohodnocením, kvůli čemuž potenciální vyučující často odcházejí ze školství do soukromé sféry. Vlivem této reality úroveň znalostí v oblasti technických oborů u absolventů základních škol dlouhodobě klesá. Většinou základní informaci o existenci vodíkových technologií získávají žáci v rámci demonstračních hodin, které zajišťují dobrovolníci z vysokých škol. Nejedná se, ale o systematickou činnost a významnou část informací získávají žáci z veřejných zdrojů, ve kterých je úroveň informací často pochybná.

8.2 Střední školství

Střední školy do značné míry kopírují problémy základních škol. Zvláště na všeobecně zaměřených gymnáziích je výuka technických oborů závislá na schopnostech daných pedagogů, tj. kvalita technického vzdělání na jednotlivých školách je značně rozdílná. Výrazně lepší situace je na technicky zaměřených školách (průmyslové školy, odborná učiliště), která jsou již specializačně zaměřená. Tento typ škol má zpravidla navázanou dlouhodobou spolupráci s průmyslovými podniky a technickými vysokými školami a částečně reflektuje jejich požadavky na kvalifikaci absolventů. Základní bariérou je nedostatek výukových materiálů a nutnost naplnit výukové osnovy, ve kterých je možná časová dotace pro výuku vodíkových technologií značně limitovaná. Zvláštním problémem nově zaváděných technologií je jejich multioborový přesah. To vyžaduje rozšíření výuky o části z jiných specializací např. částečné vzdělání v elektrotechnice pro instalatéry plynových zařízení a naopak. To vyžaduje provedení změn na úrovni rámcových vzdělávacích programů pro jednotlivé obory a případně vznik nových profesí. Bez těchto přesahů bude servis, instalace a údržba zařízení typu kogeneračních jednotek, elektrolyzérů atp. problematická.

8.3 Vysoké školství

Vysoké školy disponují značnou volností v oblasti tvorby studijních programů. To jim umožňuje modifikovat stávající nebo akreditovat zcela nové studijní programy. Základním a dlouhodobým problémem je otázka financování vysokých škol na základě množství přijatých uchazečů. Pro vysoké školy není mnohdy výhodné zavádět specializační

[199] Orlen Unipetrol Nadace, *Horizon Hydrogen Grand Prix*, 2022, <https://www.nadaceorlenunipetrol.cz/CS/Programy/Stranky/Horizon-Hydrogen.aspx>.

programy s malým počtem studentů. Současný zájem studentů nedosahuje takové úrovně, jako konkurenční obory. Výuka vodíkových technologií je tak často přidružena k hlavnímu výukovému programu formou volitelných předmětů. Absolventi technických vysokých škol tak vedle všeobecného technického základu získávají pouze obecnou informaci o vodíkových technologiích. Pouze omezené množství vysokých škol se specializačně věnuje hlubšímu pochopení vodíkových technologií. To je zpravidla ovlivněno výzkumnými aktivitami na těchto školách. Vzhledem k relativní novosti vodíkových technologií a dynamickému vývoji je pro poskytnutí relevantních informací studentům nutný trvalý kontakt pedagogů s výzkumnou a výrobní sférou. HYTEP může tento kontakt do značné míry zabezpečit.

8.4 Navazující vzdělávání

Nedílnou součástí na úrovni středního a vysokého školství je následné vzdělávání v oblasti vodíkových technologiích. Tento segment vzdělávání v České republice prakticky neexistuje. Následné rekvalifikace na úrovni techniků jsou většinou zabezpečovány samotnými společnostmi. Učitelé by měli mít možnost získat informaci o vodíkových technologiích pro začlenění do výuky. Zatímco na západ od České republiky dle asociace *Hydrogen Europe* je rekvalifikačním příkládán zásadní význam, systematická reedukace v oblasti vodíku v ČR zatím chybí.

8.5 Osvěta veřejnosti

Pozitivní přístup veřejnosti k vodíkovým technologiím je klíčovým aspektem pro rozvoj vodíkového hospodářství napříč všemi sektory. Zvláště pak v době, kdy je šíření nepravdivých informací prostřednictvím sociálních sítí na vzestupu. Všeobecné přijetí vodíkových technologií je pro zavedení do praxe zcela zásadní a promítne se i do všech stupňů vzdělávání. Trvalé působení ve veřejném informačním sektoru zdůrazňujícím význam vodíku pro transformaci hospodářství, bezpečnostní otázky atp. je pro přijetí veřejností zásadní. Na rozdíl od předchozích úrovní školství se vzdělávání veřejnosti poměrně daří především za přispění subjektů sdružených v HYTEP a státní správy.

9. Doporučená opatření pro rozvoj vodíkového hospodářství v České republice

Pro úspěšný rozvoj vodíkového hospodářství v České republice je nutná spolupráce napříč jednotlivými sektory od výroby až po spotřebu. Česká republika a její instituce mají v této otázce klíčovou roli. Podobně důležitý je nicméně vývoj legislativy na evropské úrovni. Na základě jednotlivých kapitol je v následujících bodech shrnuto množství doporučení opatření, které je nutné splnit pro správný rozvoj vodíku v České republice.

9.1 Dlouhodobá obecná doporučení

1. Česká republika by měla **dlouhodobě podporovat rozvoj vodíkové ekonomiky prostřednictvím národních i evropských podpůrných mechanismů s jasným závazkem využití konkrétního množství finančních prostředků na rozvoj vodíkového hospodářství**, a to v rámci programů jednotlivých ministerstev České republiky (OP TAK, OP Doprava, Modernizační fond, IPCEI projekty atd.).
2. Česká republika by měla **podpořit integrované projekty**^[200], které skloubí jak výrobu vodíku, tak jeho následné využití v sektorech dopravy, energetiky nebo průmyslu. Pro vodíkové projekty by bylo vhodné najít finanční instrumenty, které kromě podpory na straně výroby incentivizují i spotřebu vodíku (obzvláště v průmyslových aplikacích, kde přechod na vodík nemusí být vždy zprvu ekonomicky vhodný).
3. Česká republika musí **dlouhodobě podporovat všemi dostupnými prostředky import vodíku**, a to zejména pomocí plynovodů k dosažení emisních cílů stanovených unijní legislativou. S tím se pojí politická prioritizace tématu českou politickou scénou, která v době vydání této cestovní mapy prakticky neexistuje.
4. Česká republika by se měla zaměřit a **výrazně urychlit rozvoj obnovitelných zdrojů energie**, a to **jak solárních, tak větrných, a to zařazením obnovitelných zdrojů do kategorie staveb ve veřejném zájmu** v tzv. to-go zónách. Do těchto zón by měla zohlednit i výstavbu elektrolyzérů a navazující infrastruktury.
5. Dlouhodobým cílem České republiky by mělo být **posilování elektrizační soustavy** z důvodu elektrifikace většiny sektorů a přechodu na obnovitelné zdroje energie.
6. Česká republika by měla **personálně posílit kapacity Ministerstva průmyslu a obchodu, Ministerstva životního prostředí (včetně například Státního fondu životního prostředí) a navazujících státních institucí směrem k rozvoji obnovitelných zdrojů energie, včetně vodíkového hospodářství**, a to vzhledem ke komplexnosti rozvoje vodíkové ekonomiky a nutnosti zajistit vhodné zdroje pro rozjezd projekt.
7. Česká republika by se měla **zaměřit na daňové a další finanční či nefinanční pobídky pro výrobce klíčových vodíkových technologií** a přilákat je tak ke zvážení výstavby výrobních kapacit zejména pro palivové články, elektrolyzéry a navazující technologie na českém území a využít tak synergií mezi nástupem nových technologií a stávající výrobou zejména pro sektor automotive.

9.2 Doporučení v oblasti evropské legislativy

1. Pro Českou republiku je **důležité podpořit nastavení maximálně flexibilních pravidel pro výrobu nízkouhlíkového vodíku** v rámci dialogů k dekarbonizačnímu balíčku pro trh s plyny. Česká republika by se měla zajistit o vhodnou podporu jaderné elektřiny k výrobě vodíku elektrolyzou, či podpořit zahrnutí inovativních způsobů výroby vodíku například z odpadů pod definici nízkouhlíkového vodíku.
2. Česká republika by měla v aktualizaci **Národního akčního plánu čisté mobility vzít v potaz rozvoj plnicích stanic na území České republiky v kontextu nařízení o zavádění infrastruktury pro alternativní paliva**. Česká republika by nicméně měla k roku 2030 cílit na vyšší množství plnicích stanic (alespoň 40), než je povinná splnit v rámci unijní legislativy. K vhodnému vytipování vhodných lokalit a plánu rozvoje plnicích stanic by měla využít výsledky projektů vznikajících v Národním centru vodíkové mobility.

[200] Integrovaný projekt je inovativní typ podpory, který umožní zapojení většího množství aktérů k výstavbě a provozu celého vodíkového řešení. V praxi by takovýto projekt obsahoval jak výrobu, tak distribuci i koncové využití, kdy každý aktér bude mít slíbenou předem jasně definovanou formu financování. Takovéto projekty by pomohly překlenout základní problém vodíkového hospodářství, tedy problém nenavazující výroby ke spotřebě.

3. Česká republika by měla jasně podporovat společně s dalšími státy, například Francií, **inkluzi vodíku vyráběného jadernou elektřinou do definice nízkouhlíkového vodíku**.
4. Česká republika by s ohledem na závazné cíle směrnice o obnovitelných zdrojích energie měla **přípravit plán (aktualizaci Vodíkové strategie ČR), jakým způsobem bude tyto cíle plnit a na něj vyčlenit předem stanovené finanční prostředky**, upřednostnit by v tomto případě měla vodík v průmyslu a sektoru mobility, kde konkurenční nízkooemisní technologie narážejí a mohou narazit na technické a infrastrukturní limity.

9.3 Doporučení v oblasti národní legislativy

1. **Rozvoj vodíkového hospodářství si vyžádá komplexní aktualizaci legislativního rámce České republiky** (živnostenský zákon, stavební zákon, zákon o EIA, zákon o IPPC). Nejpozději během procesu transpozice směrnice o obnovitelných zdrojích energie a dekarbonizačního balíčku pro trh s plyny, by Česká republika měla předložit komplexní legislativní aktualizaci a doplnění vodíku do všech dotčených zákonů tak, aby podpořila jeho rozvoje napříč sektory mobility, průmyslu a v energetice.
2. Česká republika by měla přezkoumat **možnosti zavedení samostatné elektrolytické výroby vodíku z vody do zákona č. 100/2001 Sb. o posuzování vlivů na životní prostředí** a navýšit nebo zrušit limit výroby nad jehož úrovní je nutné zpracování EIA. Alternativně by EIA měla řešit nikoliv výkon elektrolyzéro, ale maximální skladovací kapacity v místě výroby.
3. Ministerstvo životního prostředí **by mělo vydat metodologii pro krajské úřady, jak postupovat v případě povolování výstavby elektrolyzéro na jejich území, tak aby nedocházelo k územním odlišnostem** napříč Českou republikou v návaznosti na konkrétní krajský úřad při procesu EIA.
4. **Dvojkolejnost skladování vodíku do značné míry komplikuje výstavbu mobilních či stacionárních zařízení.** Pokud je elektrolyzér součástí stacionární instalace, povolování je předmětem primárně požárních předpisů, pokud se jedná o mobilní zařízení, spadá uložení pod režim zákona o pozemních komunikacích. Česká republika by dvojkolejnost toho přístupu měla narovnat.

9.4 Doporučení v oblasti vzdělávání

1. **Česká republika by měla posílit technické vzdělávání na základních školách** a poskytnout učitelům dostatek výukových materiálů vztaženým k praktickému využití technické vzdělávání v jednotlivých sektorech, včetně vodíkového hospodářství. A to zejména prostřednictvím spolupráce se zájmovými skupinami a technologickými platformami.
2. Na **středních školách by měla být poskytnuta dostatečná kvalita vzdělávacích materiálů**, včetně **metodické podpory výuky vodíkových** technologií. Zásadním je poskytnout kombinované vzdělávání s částečnou kvalifikací v dalších oborech.
3. Na vysokých školách by mělo dojít zejména k **zvýšení zájmu studentů o vodíkové technologie pomocí podpory náborových akcí a PR kampaní** podporující obory s vysokou přidanou hodnotou. Tyto náborové akce se nemusí nutně týkat jen vodíku, ale je možné je souhrnně financovat v balíčku společně s dalšími rozvíjejícími se technologiemi.
4. Česká republika by dlouhodobě měla **podporovat zavádění možnosti rekvalifikaci** na vodíkové technologie, stavět granty a způsoby ověření této rekvalifikace.

Seznam zkratek

Zkratka	Definice
AEFC	Alkalický palivový článek
AEL	Alkalický elektrolyzér vody
AEMEL	Elektrolyzér s anioselektivní membránou
AFIR	Nařízení o zavádění infrastruktury pro alternativní paliva
CCS	Zachytávání a ukládání oxidu uhličitého
CCU	Zachytávání a využívání oxidu uhličitého
CRL	Úroveň komerční připravenosti
DMFC	Palivový článek přímo využívající methanol
DOE	Ministerstvo energetiky USA
ENNOH	Evropská síť provozovatelů vodíkových sítí
ENTSO-E	Evropská síť provozovatelů přenosových soustav
ENTSO-G	Evropská síť provozovatelů přepravních soustav
HYTEP	Česká vodíková technologická platforma
CHG	Stlačený plyný vodík
CHP	Clean Hydrogen Partnership
IEA	Mezinárodní agentura pro energii
IPCEI	Důležité projekty společného evropského zájmu
IRENA	Mezinárodní agentura pro obnovitelnou energii
LH2	Zkapalněný vodík
LNG	Zkapalněný zemní plyn
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carrier
MEA	Kompozit membrány a elektrod
NZIA	Net Zero Industry Act
PEMEL	Elektrolyzér vody s protonově vodivou membránou
PEMFC	Palivový článek s protonově vodivou membránou
POX	Parciální oxidace ropných zbytků
PPA kontrakt	Smlouva o nákupu energie napřímo (většinou obnovitelné)
RED	Směrnice na podporu využívání energie z obnovitelných zdrojů
RFNBO	Obnovitelná paliva nebiologického původu
SOEL	Vysokoteplotní elektrolyzér vody s elektrolytem na bázi pevných oxidů
SOFC	Vysokoteplotní palivový článek s elektrolytem na bázi pevných oxidů
TEN-T	Transevropská dopravní síť
TRL	Úroveň technologické připravenosti



EVROPSKÁ UNIE
Evropský fond pro regionální rozvoj
Operační program Podnikání
a inovace pro konkurenceschopnost

PROJEKT „ČESKÁ VODÍKOVÁ TECHNOLOGICKÁ PLATFORMA 2023“
CZ.01.1.02/0.0/0.0/20_369/0025119