

## RAZVOJNA STRATEGIJA ZA HYDROGEN CENTER

### V ČEZMEJNI REGIJI INTERREG SLOVENIJA IN AVSTRIJA

### OD INOVACIJSKEGA OKOLJA DO INOVACIJSKEGA EKOSISTEMA

Julij 2022

Naročnik:

Štajerska gospodarska zbornica

Izvajalec: Zavod CENTER ARI

Doc. Dr. Gregor Dolanc, Dr. Vladimir Jovan

V sodelovanju s:

Štajersko gospodarsko zbornico: Dr. Dragico Marinič

### Projekt H<sub>2</sub>GreenTECH

Spletna stran: <https://www.h2greentech.eu/>

Naslov projekta: Krepitev čezmejnih zmogljivosti R&I na področju naprednih vodikovih tehnologij z razvojem sinergij med podjetji, centri za raziskave in razvoj ter visokošolskim izobraževanjem.

### Projektni partnerji

Kemijski inštitut, Slovenija

Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport, Slovenija

Štajerska gospodarska zbornica, Slovenija

TU Graz, Avstrija

Carinthia University of Applied Sciences, Avstrija

Research Burgenland, Avstrija

### HYDROGEN CENTER

Spletna stran: <https://b2b.h2greentech.eu/>

Kontakt: [hydrogencenter@stajerskagz.si](mailto:hydrogencenter@stajerskagz.si)

Posebna zahvala dr. Petru Raimann iz Energetske agencije Avstrije za sodelovanje pri pripravi podatkov za Avstrijo.

## KRATICE

AT	Avstrija
B2B	Business to Business
CO NOT	Center odličnosti Nizkoogljične tehnologije
FCH JU	Združenje za gorivne celice in vodih
kWh	Kikowatt ura
MWh	Megawatt ura
GWh	Gigawatt ura
TWh	Terawatt ura
H <sub>2</sub>	Vodik
IJS	Institut Jožef Stefan, Slovenija
KI	Kemijski inštitut, Slovenija
MORS	Ministrstvo za obrambo Republika Slovenija
MSP	Mala in srednja podjetja
NEPN	Nacionalni energetske in podnebni načrt
OVE	Obnovljivi viri energije
RCVT	Razvojni center vodikove tehnologije, Slovenija
R&D	Raziskave in razvoj
SI	Slovenija
SGZ	Štajerska gospodarska zbornica
TU Graz	Tehniška univerza v Grazu
UL FS	Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo
UM FKKT	Univerza v Mariboru, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo
UNG	Univerza v Novi Gorici

## Vsebina

<b>1</b>	<b>UVOD</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>REGIONALNI VODIKOV CENTER IN RAZVOJNA STRATEGIJA 2025</b> .....	<b>6</b>
2.1	REGIJSKI OKVIR ZA VODIKOVE TEHNOLOGIJE .....	6
2.2	POVEČANJE OBSEGA IN PRISTOP K INOVACIJAM .....	6
<b>3</b>	<b>VLOGA VODIKA</b> .....	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>PREGLED RAZISKOVALNIH IN RAZVOJNIH AKTIVNOSTI IN DEMONSTRACIJSKIH PROJEKTOV</b> .....	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>IZOBRAŽEVALNE AKTIVNOSTI POVEZANE Z VODIKOVIMI TEHNOLOGIJAMI</b> .....	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>MOŽNOSTI UPORABE ZELENEGA VODIKA</b> .....	<b>24</b>
<b>7</b>	<b>MOŽNOSTI ZA PROIZVODNJO ZELENEGA VODIKA</b> .....	<b>27</b>
<b>8</b>	<b>PROIZVODNI STROŠKI ZELENEGA VODIKA</b> .....	<b>29</b>
<b>9</b>	<b>VODIKOVE TEHNOLOGIJE ZA BALANSIRANJE ELEKTRO-ENERGETSKEGA SISTEMA</b> .....	<b>31</b>
<b>10</b>	<b>OKOLJSKE PREDNOSTI UPORABE ZELENEGA VODIKA</b> .....	<b>34</b>
<b>11</b>	<b>MOŽNOSTI ZMANJŠANJA ODVISNOSTI OD UVOZA FOSILNIH GORIV</b> .....	<b>37</b>
<b>12</b>	<b>ZAKONODAJA</b> .....	<b>38</b>
<b>13</b>	<b>SODELOVANJE MED SEKTORJI</b> .....	<b>40</b>
<b>14</b>	<b>VERIGA VREDNOSTI PROIZVODNJE OPREME IN STORITEV</b> .....	<b>42</b>
<b>15</b>	<b>MOŽNOSTI NADGRADNJE PROJEKTA H2GREENTECH</b> .....	<b>43</b>
<b>16</b>	<b>REFERENCE</b> .....	<b>45</b>

## 1 Uvod

Da bi poglobili sodelovanje in povezovanje ter okrepili kritično maso zmogljivosti na področju vodika in vodikovih tehnologij, je bila v okviru projekta H2GreenTECH Interreg SI-AT vzpostavljena trajnostna regionalna raziskovalna in industrijska mreža v obliki HYDROGEN CENTRA. V projekt H2GreenTECH so vključeni partnerji iz Slovenije in Avstrije (Koroške, Štajerske in Gradiščanske) z namenom okrepiti regionalno sodelovanje ter raziskave in inovacije na področju vodikovih tehnologij s čezmejnimi sodelovanjem med podjetji, raziskovalno-razvojnimi (R&R) centri in visokošolskimi ustanovami.

Hydrogen Center kot točka "vse na enem mestu" (One-Stop Shop) in B2B platforma: izboljšati dostop do raziskovalne infrastrukture na področju vodika v Sloveniji in Avstriji ter njeno uporabo v sodelovanju med podjetji, raziskovalci ter študenti in predavatelji.

Zaradi povečevanja svetovne porabe energije je nujno potrebno razviti in uvajati nove alternative fosilnim gorivom. Pričakovana rast emisij toplogrednih plinov in močna odvisnost od fosilnih energetskega virov sta močna razloga za prehod na nove alternative in spodbudo industrijskim akterjem k vlaganju v različne tehnologije. V tem kontekstu je vodik v Evropi in po svetu ponovno deležen vedno večje pozornosti. Vodik se lahko uporablja kot surovina, gorivo ali kot medij prenosa in shranjevanja energije ter ima številne možne aplikacije v industriji, prometu, energetiki in gradbeništvu [4], [5]. Najpomembnejša lastnost vodika je, da se pri njegovi uporabi ne sprošča CO<sub>2</sub> in zato ne onesnažuje ozračja. Vodik je tako ena izmed rešitev za razogljičenje industrijskih procesov in drugih gospodarskih sektorjev.

## 2 Regionalni vodikov center in razvojna strategija 2025

Razvojna strategija vodikovega centra do leta 2025 in nadalje je ključna za delovanje članov regionalne mreže Hydrogen center kot trajnostnega rezultata projekta H2GreenTECH v čezmejnem območju Interreg Slovenija-Avstrija. Cilj razvojne strategije je krepitev regionalnih inovacijskih zmogljivosti, spodbujanje mreženja in sodelovanja na področju raziskav in razvoja ter prenosa zelenih in čistih tehnologij v gospodarstvo. Na ta način bomo prispevali k večji čezmejni konkurenčnosti ter razvoju inovativnih in dinamičnih podjetij na področju zelenega vodika in vodikovih tehnologij.

Vodik (H<sub>2</sub>) in tehnologije gorivnih celic so ključne tehnologije za konkurenčno nizkoogljčno družbo in hkrati za nizkoogljčno regijo. Te tehnologije neposredno obravnavajo družbene izzive, opredeljene v strategiji EU 2020, Zelenem dogovoru EU in strategiji EU za vodik.

Glede na doslej razpoložljive podatke je največji potencial za inovacije v malih in srednjih podjetjih, pri čemer pa se proizvodnja razvitih rešitev lahko odvija v velikih podjetjih. Zato je skupna naloga članov Hydrogen centra spodbujati k inovacijam v malih in srednje velikih podjetjih (MSPjih), ki prevladujejo v čezmejnem območju.

To so novi izzivi za regionalno mrežo Hydrogen center in njegove člane, da skupaj preučijo svoje razvojne usmeritve, izvajanje, spremljanje in vrednotenje inovacijske politike in inovacij v regiji na področju zelenega vodika in vodikovih tehnologij.

Razvojna strategija Hydrogen center med drugim upošteva izhodišča Načrta za vodikove tehnologije v Sloveniji in Avstriji [1] ter NEPN Slovenije [2] in NEPN Avstrije[3]. Za Avstrijo smo upoštevali tudi novo Strategijo za vodik, ki je bila sprejeta junija 2022 (Slovenija strategije še nima), ter druge dodatne dokumente, pomembne za raziskave in razvoj, proizvodnjo in uporabo zelenega vodika in vodikovih tehnologij.

### 2.1 Regijski okvir za vodikove tehnologije

Čezmejna regija ima močno raziskovalno in razvojno dejavnost ter gospodarstvo, vendar je razvoj vodika in vodikovih tehnologij bolj ali manj v začetni fazi.

Načrt za vodikove tehnologije v Sloveniji in Avstriji v okviru projekta H2GreenTECH predstavlja poglede številnih deležnikov iz vladnih in industrijskih, pa tudi nevladnih in akademskih krogov na čezmejno sodelovanje pri razvoju vodikovih tehnologij do leta 2025 in pozneje.

Člani Hydrogen centra se zavedajo, da so raziskave in razvoj ter prenos vodika in vodikovih tehnologij v gospodarski sektor ključnega pomena v čezmejni regiji, zlasti z vidika inovacij in večje konkurenčnosti ter z namenom prispevati k nizkoogljčni družbi.

### 2.2 Povečanje obsega in pristop k inovacijam

Čezmejna regija lahko postane ena od vodilnih z inovativnimi dosežki pri razvoju zelenega vodika in vodikovih tehnologij. Zato je cilj čezmejne mreže Centra za vodik kot "vse na enem mestu" in platforme B2B intenzivno mreženje ter spodbujanje projektne sodelovanja in iskanja skupnih inovativnih rešitev.



## HYDROGEN CENTER

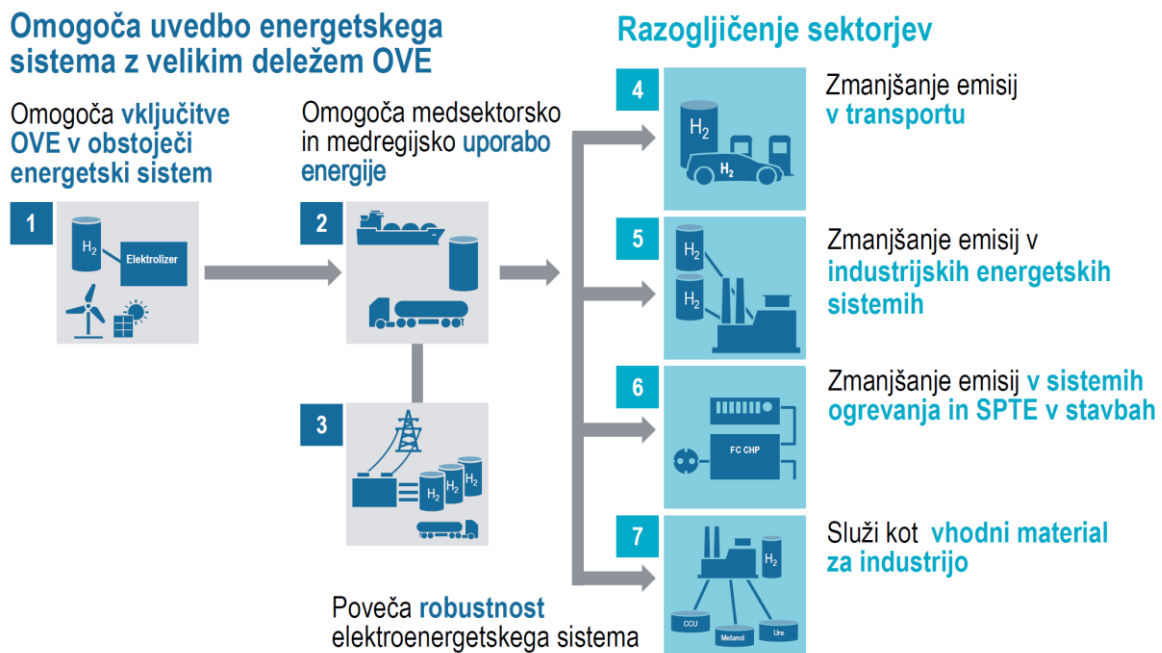
Delo centra bo osredotočeno na tehnološke inovacije v okviru regionalnih inovacijskih politik ter na priložnosti za družbene inovacije. Na podlagi članstva bo Center za vodik deloval po modelu štirikratne vijačnice.



Ta projekt sofinancira Evropski sklad za regionalni razvoj v okviru programa sodelovanja Interreg V-A Slovenija-Avstrija. <sup>1</sup>

### 3 Vloga vodika

Vodik je obetaven energetski vektor/nosilec, vendar način današnje proizvodnje (večinoma parni reforming zemeljskega plina) ni v skladu z dolgoročnimi podnebnimi in energetskimi cilji. Vodik, pridobljen z elektrolizo vode, ki jo poganjajo obnovljivi viri (fotovoltaika, veter, vodna energija), prinaša dodano vrednost, saj njegova proizvodnja ne povzroča emisij CO<sub>2</sub>, zato ga imenujemo "zeleni vodik" [6]. Zato lahko ključno prispeva k zmanjšanju emisij CO<sub>2</sub> in zmanjšanju lokalnega onesnaževanja, pripomore lahko k zagotovitvi energetske neodvisnosti in k doseganju trajnostnih ciljev, kot kaže Slika 1.

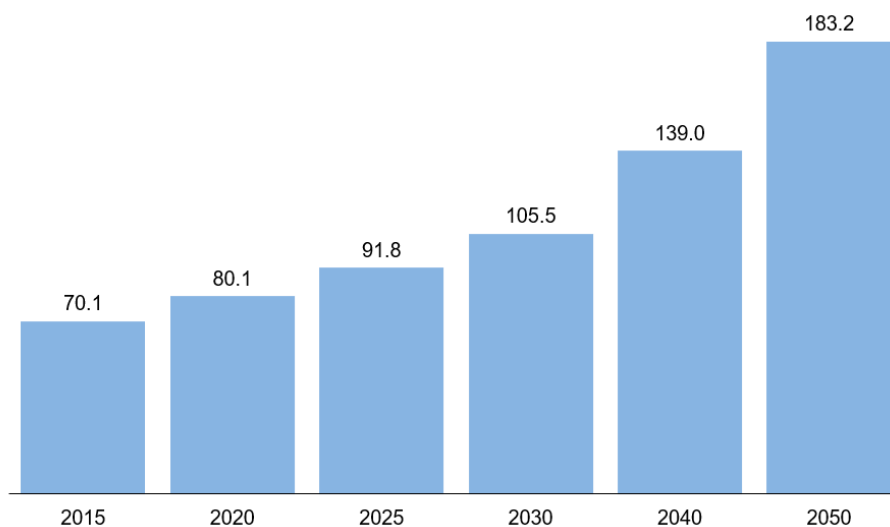


Slika 1: Potenciali uvedbe vodikovih tehnologij [4]

V zadnjih nekaj letih so številne države EU (Portugalska, Španija, Nemčija, Nizozemska, Norveška, Madžarska, Francija) ter nekaj drugih (Japonska, Kitajska, ZDA, Velika Britanija, itd.) sprejele lastne vodikove strategije in že izvajajo politike, ki povečujejo vlogo vodika v različnih aplikacijah. Vsi ti dejavniki bodo povečali svetovno povpraševanje po vodiku s približno 80 milijonov ton na leto v letu 2020 ter na več kot 183 milijonov ton na leto do leta 2050. Napoved porabe vodika prikazuje Slika 2.

Danes je skupna letna proizvodnja vodika v EU približno 8 milijonov ton H<sub>2</sub>, kjer EU industrija danes predstavlja več kot 90 % tržnega deleža vodika. Glavni industrijski porabniki so:

- 63 % kemijska industrija,
- 30 % rafinerije,
- 6 % obdelava kovin,
- 1 % drugi.



Slika 2: Napoved svetovnega povpraševanja po vodiku v milijonih ton na leto [7]

Vendar pa uvedba vodika kot energetskega vektorja ni le tehnološki izziv, temveč zahteva tudi usklajevanje in konvergenco ciljev številnih političnih in družbeno-ekonomskih dejavnikov. Politična volja, izboljšana zakonodaja in ustrezna finančna podpora so instrumenti, ki bodo potrebni za spodbujanje uporabe zelenega vodika. Zeleni vodik ima številne prednosti, vendar so sočasno potrebne tudi politične pobude, ki bodo pomagale zmanjšati proizvodne stroške in odstraniti tržne ovire.

Potrebne sistematične pobude so predvsem tiste, ki:

- zmanjšujejo lokalne emisije;
- zmanjšujejo svetovne emisije toplogrednih plinov;
- povečujejo energetske varnost z uporabo lokalnih virov in alternativnih virov energije;
- razvijajo nova tehnološka področja in s tem nova delovna mesta.

Poleg političnih odločitev bo za prihodnost vodikovega gospodarstva izjemno pomembna sposobnost industrije, da še naprej znižuje stroške izdelave in uporabe gradnikov vodikovih tehnologij, kar je pogoj za množično proizvodnjo potrebne opreme.

Ob koncu naj navedemo kratko SWOT analizo vodikovih tehnologij:

#### PREDNOSTI (S)

- Praktično neizčrpne zaloge (vezanega) vodika v naravi (glej pomanjkljivosti spodaj)
- Velik razvojni potencial novih tehnologij
- Veliki učinki pri ohranjanju okolja, predvsem razogljičenju
- Zmanjšanje odvisnosti od klasičnih dobaviteljev energije
- Vodik je primerno pogonsko gorivo za vse tipe vozil

#### HYDROGEN CENTER

- Možnosti skladiščenja vodika za različne namene
- Skladiščenje energije, pridobljene iz obnovljivih virov, omogoča njihovo večjo fleksibilnost uporabe
- Prilagodljivost načina distribucije in shranjevanja vodika
- Ohranitev obstoječega načina polnjenja goriv in navad potrošnika

#### POMANJKLIVOSTI (W)

- Za generiranje elementarnega vodika je potreben dovod energije
- Relativno visoki investicijski stroški
- Pomanjkanje zrelosti ključnih tehnologij
- Pomanjkljiva ali nepopolna infrastruktura za shranjevanje, transport in distribucijo vodika
- Nizka učinkovitost vodikove oskrbovalne verige
- Potrebne so predhodne investicije v infrastrukturo
- Pomanjkanje izkušene delovne sile

#### PRILOŽNOSTI (O)

- Zmanjšanje odvisnosti od fosilnih goriv
- Možnost pridobitve državnih subvencij
- Družbena sprejemljivost za prehod v nizkoogljično okolje
- Možnost poglobljenega sodelovanja med sektorji energetike, industrije in transporta
- Vodilna tehnologije za shranjevanje energije
- Vzpostavitev enotnih mednarodnih standardov za vodikove tehnologije
- Zmanjšanje emisij in drugih negativnih vplivov na okolje
- Možnost proizvodnje vodika v velikem obsegu
- Decentralizacija proizvodnje, skladiščenja in transporta vodika

#### NEVARNOSTI (T)

- Primanjkljaj obsega potrebnih investicijskih sredstev
- Tekmovanje z drugimi načini pridobivanja in shranjevanja obnovljive energije
- Nepotrjen/neznan tržni potencial
- Vežanost na izbranega dobavitelja/proizvajalca opreme
- Pomanjkanje dobaviteljev ključne opreme.

#### 4 Pregled raziskovalnih in razvojnih aktivnosti in demonstracijskih projektov

Naslov projekta	Trajanje	Projektni partnerji	Opis projekta	Financiranje
Mednarodni R&I projekti				
Spremljanje degradacije visokotemperaturnih elektrolizerjev z namenom podaljšanja življenjske dobe	2018-20	IJS	Ocena življenjske dobe SOFC elektrolizerjev	Bilateralni projekt SLO-CEA 2018-2020
Razvoj inovativnega pomožnega vira napajanja za vojaške namene, ki temelji na visokotemperaturnih PEM gorivnih celicah in tehnologiji reforminga vojaških logističnih goriv – IAPUNIT	2019-20	IJS KI TU Graz	Razvoj inovativne pomožne pogonske enote za vojaške namene	Projekt EDA- Evropska obrambna agencija
Napredna elektrokemijska karakterizacija intrinzičnih lastnosti in izboljšanje najsodobnejših reakcijskih elektrokatalizatorjev za redukcijo kisika brez CRM s SECM in plavajočo elektrodo	2019-21	KI	Projekt predlaga sintezo novih cenovno dostopnih, učinkovitih in stabilnih katalizatorjev na osnovi funkcionaliziranih nanogljičnih materialov za uporabo v nizkotemperaturnih katodah gorivnih celic	ARRS: NC-0006

## HYDROGEN CENTER

Visoko aktivna katoda z izjemno nizko vsebnostjo PGM in integracijo MEA za sintezo PEMFC celice	2019-21	KI	Raziskave o možnostih uporabe novih bolj aktivnih elektrokatalizatorjev v membransko-elektrodnem sklopu (MEA) za komercializacijo te tehnologije	ARRS-CEA NC-0007
Spremljanje stanja in ocena življenjske dobe trdooksidnih gorivnih celic in elektrolizatorjev	2018-19		Razvoj novih algoritmov za oceno stanja SOFC gorivnih celic	Bilateralni projekt BI-AT/18-19-010
Optimizacija katalizatorjev gorivnih celic v integraciji z reformingom	2020 – 2024	KI	Razvoj integriranega prototipa gorivnih celic, ki temelji na visoko učinkovitih elektrokatalizatorjih (na osnovi platine in brez platine) na nosilcih na osnovi grafena.	NATO SPS Programme
Proti nanostrukturiranim elektrokatalizatorjem z vrhunsko stabilnostjo	2020-24	KI	Projekt raziskuje spremembe v atomski strukturi nanodelcev elektrokatalizatorja pri njegovem delovanju v nizkotemperaturnih gorivnih celicah in elektrolizerjih.	ERC-STG - Starting Grant
Strategija za obnovitev učinkovitosti in napredno vodenje za učinkovito delovanje gorivnih celic	2018-21	TU Graz	Projekt se nanaša na razvoj vzdržljivih PEM gorivnih celic in ima naslednje opredeljene cilje: identificirati nizkoškodljive procese pri zagonu in zaustavitvi PEM gorivnih celic ter razviti nove nadzorne postopke za njihovo dinamično delovanje.	BMK Mobilität der Zukunft

### HYDROGEN CENTER

FC-Core	2021-22	TU Graz	Vsebina projekta FC-Core se nanaša na razvoj, patentiranje in prikaz prototipov za sklad sistema gorivnih celic.	Zukunftsfonds Steiermark
MEA na osnovi grafenskega oksida za etanolne gorivne celice	2019-21	TU Graz UL UM	Razvoj novih anodnih in katodnih katalizatorjev, ki vsebujejo nežlahtne kovine, in novih anionskih izmenjevalnih membran na osnovi trajnostnih in ekonomičnih materialov za uporabo v alkalnih gorivnih celicah.	FWF
Elektrokatalizatorji brez plemenitih kovin za regenerativne alkalne gorivne celice	2019-20	TU Graz	Cilj projekta je sintetiza in karakterizacija stroškovno učinkovitih materialov, ki podpirajo reakcije evolucije vodika (HER) in redukcije kisika (ORR) v dveh napravah: gorivni celici in elektrolizerju	#
FluMaBack – izboljšanje komponent za rezervne energetske sisteme z gorivnimi celicami	2012 - 15	IJS UL FS	Razvoj in izboljšanje različnih BoP komponent za PEM gorivne celice	FP7
DIAMOND – Vodenje SOFC sistemov gorivnih celic s pomočjo uporabe diagnostike	2014 – 17	IJS	Uporaba elektrokemične impedančne spektroskopije za oceno preostale življenjske dobe SOFC sistema	FP7

## HYDROGEN CENTER

MEAPower - Kompozitni materiali za dolgoročno stabilne stacionarne PEM gorivne celice s povečano gostoto moči	2015-18	TU Graz AVL UL FS	V sklopu projekta se je na laboratorijski ravni razvilo in izdelalo nizkocenovni membransko elektrodni sklop - MEA (<€ 0.60 / cm <sup>2</sup> ), ki omogoča doseganje predvidene življenjske dobe 80,000 ur pod realnimi obratovalnimi pogoji.	BMK Klima- und Energiefonds
SOH4PEM – Ocenjevalci tehničnega stanja PEM gorivnih celic	2016-19	TU Graz UL FS	Razvoj naprave za oceno trenutnega tehničnega stanja avtomobilske gorivne celice	BMK Klima- und Energiefonds
INSIGHT - Implementacija diagnostičnih orodij za spremljanje z uporabo analize signalov za podaljšanje njihove življenjske dobe realnih SOFC sistemov	2017 – 19	IJS	Razvoj diagnostičnega programskega orodja za napovedovanje življenjske dobe SOFC sistemov	FP7
MEMPHYS - Membransko čiščenje vodikovega sistema	2017 – 19	IJS	Razvoj elektrokemične kompresorske enote (do 1000 barov)	Horizon 2020
RUBY - Robustno in zanesljivo splošno orodje za vodenje stacionarnih gorivnih celic za izboljšanje njihove zmogljivosti in vzdržljivosti	2020 – 23	IJS	Razvoj orodja za cceno trajnosti stacionarnih enot gorivnih celic	Horizon 2020

### HYDROGEN CENTER

REACTT – Zanesljiva napredna orodja za diagnostiko in nadzor za podaljšanje življenjske dobe SOFC gorivnih celic	2021 -23	IJS AVL	Projekt REACTT se ukvarja z razvojem HW platforme za optimalen nadzor, spremljanje stanja in oceno preostale življenjske dobe za sisteme s trdno oksidno elektrolizo (SOE) in reverzno trdno oksidno celico (rSOC).	Horizon 2020
SOFC5-60 – Razvoj visoko učinkovite 5-kWel SOFC SPTE za potrebe po električni in toplotni energiji v zgradbah in majhnih industrijah	2017-21	Forschung Burgenland	Ocena ekonomske upravičenosti uporabe 5-kWel SOFC SPTE (soproizvodnja toplote in elektrike s trdnimi oksidnimi gorivnimi celicami) za stanovanjske in nestanovanjske aplikacije.	#
Popolnoma integriran reverzibilni sistem trdnih oksidnih celic	2019-21	Forschung Burgenland	Razvoj reverzibilnega sistema trdno oksidnih gorivnih celic (rSOC)	#
»Chemical Looping« za učinkovito izrabo biomase	2020-24	TU Graz KI	Raziskovanje tehnologij »chemical looping« v zvezi z zajemanjem in shranjevanjem ogljika iz bioenergije (BECCS). Cilj je izbrati obetavne tehnologije za decentralizirano proizvodnjo obnovljive toplote, električne energije in vodika iz biomase z negativnimi emisijami CO <sub>2</sub> .	BMK COMET-Module
Best4Hy - Trajnostne rešitve za recikliranje izrabljene opreme vodikovih tehnologij	2021-23	UL FS	Razvoj, dodelava in ovrednotenje postopkov reciklaže kritičnih materialov, elementov redkih zemelj ter kobalta in niklja kot dveh pomembnih materialov v proizvodnji vodikovih tehnologij	Horizon 2020

HYDROGEN CENTER

eGHOST - Vzpostavitev smernic za okoljsko zasnovano vodikovih sistemov in tehnologij	2021-23	UL FS	Projekt obravnava ekološko (pre)oblikovanje tehnologij izdelave opreme vodikovih tehnologij. Glavni del projekta bo usmerjen v eko-snovanje, z vključitvijo preostalih dveh stebrov trajnostnega razvoja – družbenega in gospodarskega.	Horizon 2020
MORELife – Optimizacija materiala, operativne strategije in zanesljivosti za vseživljenjske izboljšave v težkih tovornjakih	2021-24	AVL Mebius UL FS	Razvoj inovativne metodologije za določanje in prepoznavanje degradacijskih mehanizmov na podlagi eksperimentalnih podatkov pridobljenih iz dejanske uporabe, ki bodo omogočali izboljšanje starih in razvoj novih bolj specifičnih pospešenih stresnih testov (AST) za oceno ter razvoj naprednih degradacijskih modelov	Horizon 2020
ELUVAT - Razvoj inovativnega električnega lahkega terenskega vozila za obrambne namene na osnovi elektromotorjev v kolesih	2022-23	GDELS-Mowag AVL List AVL Schrick AVL SLO ELAPHE UL FS	V projektu bodo virtualno raziskani različni elektrificirani pogonski sistemi za vozila (hibriden električen pogonski sistem, baterijsko električni pogon in hibridni pogonski sistem z gorivno celico)	#

## HYDROGEN CENTER

H2GreenTECH	2020-2022	KI TU Graz Štajerska gospodarska zbornica FH Kärnten Forschung Burgenland	Krepitev regionalnega sodelovanja na področju vodikovih tehnologij s čezmejnimi sodelovanjem podjetij, R&R centrov in visokošolskim izobraževanjem.	Interreg V SI-AT
Nacionalni R&I projekti				
SOFC4City - Uporaba odpadne toplote SOFC gorivnih celic za zgradbe in industrijo	2015-16	Forschung Burgenland Austrian Energy Agency Vaillant	Možnosti uporabe SOFC gorivnih celic za oskrbo z energijo (toplota in električna energija) v urbanih območjih.	#
Napovedovanje stanja iztrošenosti elektrokemičnih energetskega sistemov	2016-19	IJS	Razvoj postopka za spremljanje stanja elektrokemijskih energetskega sistemov	Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije, Sofinancer: Domel d.o.o.
Od modela do realnega elektrokatalizatorja	2018-20	KI IJS	Glavni cilj predlaganega temeljnega raziskovalnega projekta je razvoj katalizatorja na osnovi prehodnih kovin, ki vsebuje aktivne centre, primerne za neposredno pretvorbo CO <sub>2</sub> in H <sub>2</sub> v metanol.	Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije: Z1-9165
Optimizacijsko vodenje pretvornika energije v vodik v povezavi s hidro elektrarno	2019-22	IJS	Uporaba in vodenje P2G sistema za proizvodnjo vodika v hidroelektrarni	Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije, Sofinancer: HESS d.o.o.

## HYDROGEN CENTER

Razvoj in predstavitev ključnih tehnologij za nizkocenovne platforme električnih vozil	2017-20	TU Graz	V projektu KEYTECH4EV je bilo raziskanih več industrijskih avtomobilskih agregatov s PEM gorivnimi celicami z namenom identifikacije najbolj izvedljive konfiguracije in napovedovanja njihove življenjske dobe v realnih pogojih	BMK Klima- und Energiefonds
RESHUB - Podpora trajnostni energiji in mobilnosti v slovenskem obrambnem sektorju	2021-22	MORS UL FS	Projekt se osredotoča na podporo in oskrbo Slovenskih vojašnic s trajnostnimi viri in mobilnostjo. Cilj projekta je analiza energetske potrebe v vojaških objektih in možnosti samooskrbe z električno energijo in vodikom kot pogonskim gorivom	Projekt v pripravi
Industrijski projekti po pogodbah				
TESTLAB – Laboratorij za vodikove tehnologije	2014-16	IJS	Kontejnerski laboratorij za demonstracijo in validacijo vodikovih tehnologij. Sestavljen je iz 1 kW PEM gorivnih celic, različnih vrst hranilnikov H <sub>2</sub> , elektrolizerja, sončnih celic, električnih in toplotnih pretvornikov ali skladišč.	Ministrstvo za obrambo Republike Slovenije
Študija izvedljivosti vgradnje sistema P2G v hidroelektrarno HE Brežice	2020	IJS	Soproizvodnja električne energije in vodika v hidroelektrarni in ocena finančnih učinkov	HES d.o.o, pogodba U4-KE-E2-48/19

## HYDROGEN CENTER

Izbira opreme za shranjevanje energije, ki zagotavlja fleksibilnost delovanja Dravskih elektrarn	2019		Študija izvedljivosti opreme za shranjevanje energije, ki zagotavljajo fleksibilnost delovanja Dravskih elektrarn	Dravske elektrarne d.o.o., Maribor
Določitev potrebne moči in kapacitete shranjevanja za zagotovitev rezerve za avtomatsko obnovo frekvence v HSE d.o.o.	2019		Ocena potrebne moči in kapacitete za shranjevanje energije za zagotavljanje ustrezne rezerve za samodejno ponovno vzpostavitev frekvence	Dravske elektrarne Maribor d.o.o.
Enotna metodologija za ocenjevanje rešitev v naprednem distribucijskem sistemu	2020		Priporočila za vrednotenje rešitev v naprednem distribucijskem sistemu	Sistemiški operater distribucijskega omrežja Slovenije
Uvajanje trga energetske fleksibilnosti v Sloveniji: analiza stanja in izhodišča	2020		Analiza stanja in priporočila za uvedbo trga energetske fleksibilnosti v Sloveniji	Agencija za energijo Republike Slovenije
Demonstracijski projekti				
HyMIV – pomožni vir napajanja na osnovi gorivnih celic PEM za vojaško vozilo za posebne namene	2010	JSI	7 kW električni generator na osnovi PEM gorivnih celic je bil nameščen kot pomožni vir energije za elektronsko opremo, nameščeno v vojaško vozilo	MORS
30 KW PEM FC APU	2014	Genera	Vgradnja 30 KW sistema neprekinjenega napajanja v vojaškem objektu	MORS

### HYDROGEN CENTER

Instalacija 1. vodikove polnilnice	2013	CONOT	V Lescah pri Bledu je bila postavljena prva vodikova polnilnica	Petrol d.d., CONOT
GCCOGEN - Demonstracijski prototip kogeneracijskega sistema na osnovi gorivnih celic	2014-16	JSI	Vgradnja 8 KW PEM sistema gorivnih celic za oskrbo z električno energijo in toplo vodo v mobilnem vojaškem bivalnem kontejnerju	MORS
SustainHuts - Trajnostne planinske koč v Evropi	2016-21	RCVT UL FS	Energetska posodobitev devetih planinskih koč iz štirih evropskih držav (Španija, Italija, Romunija in Slovenija) z namenom zmanjšanja škodljivih emisij	LIFE Programme
Optimizacija pretvorbe energije za zmanjšanje deleža fosilnih goriv z vodikom pri industrijskem taljenju stekla	2017-20	NIC, UL FS	V projektu je bil razvit, instaliran in prikazano delovanje inovativne tehnološke rešitve uporabe vodika v steklarski peči na osnovi uporabe vodika, s katero smo zmanjšali emisije ogljika na enoto stekla, proizvedenega s čistim, nizkoogljicnim plinastim vodikom.	#
Instalacija 2. vodikove polnilnice	2021	Ecubes technologies Salonit Anhovo	V Anhovu, Slovenija je bila postavljena druga vodikova polnilnica	#
Sprotna izraba bioplina za decentralizirano proizvodnjo vodika	2020-21	TU Graz	Projekt prikazuje in tehno-ekonomsko potrjuje potencial uporabe »chemical looping« postopka s fiksno plastjo za proizvodnjo vodika iz bioplina	#



### HYDROGEN CENTER

SENERGY NETS - Povečanje sinergije med različnimi ENERGETSKIMI OMREŽJI	2022-26	Energetika Ljubljana UL FS	Prikaz tehnične in ekonomske sposobnosti več-energetskih sistemov za razogljičenje sektorjev ogrevanja/hlajenja, energetike in plina s pomočjo lokalnih obnovljivih virov energije	#
--	---------	-------------------------------	--	---



Ta projekt sofinancira Evropski sklad za regionalni razvoj v okviru programa sodelovanja Interreg V-A Slovenija-Avstrija.

ean Regional Development Fund under the Program Interreg V-A SI-AT.

## 5 Izobraževalne aktivnosti povezane z vodikovimi tehnologijami

Slovenski visokošolski zavodi trenutno izvajajo vrsto predmetov na vseh treh stopnjah študijskega programa, ki so povezani z razvojem in uporabo vodikovih tehnologij.

Fakulteta	Predmet
Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani	Energetika in okolje
	Alternativni viri električne energije in energetski trgi
	Trajnostna oskrba z električno energijo
	Energetika
Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani	Energije in okolje
	Energetski stroji in naprave
	Trajnostni viri električne energije
	Elektromobilnost
	Energetika v krožnem gospodarstvu
	Kemični nosilci energije
Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, Univerza v Ljubljani	Kemija za trajnostni razvoj
	Elektrokemija
	Uporabna elektrokemija
Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana, Ljubljana	Gorivne celice
	Obnovljivi viri energije
Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Univerza v Mariboru	Pretvarjanje energije
	Pretvarjanje energije in električna omrežja
Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, Univerza v Mariboru	Energetski management
Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru	Goriva za trajnostni razvoj
Fakulteta za znanosti o okolju, Univerza v Novi Gorici	Funkcionalni materiali
	Napredni funkcionalni materiali
ECUBES TEHNOLOGIJE d.o.o. Fakulteta za logistiko, Univerza v Mariboru	H2STUDENT

Avstrijski partnerji/univerze, vključene v projekt, tudi izvajajo več različnih izobraževalnih programov in tečajev na vseh treh stopnjah študijskega programa, ki so povezani z razvojem in uporabo vodikovih tehnologij.

Fakulteta	Predmet
University of Applied Sciences Burgenland	Uporaba tehnologije in upravljanja
	Trajnostni energetski sistemi
	Upravljanje energije in okolja
	Laboratorij z gorivnimi celicami
Graz University of Technology	Napredni študij PEM gorivnih celic
	Shranjevanje in pretvorba energije
	Proizvodnja in shranjevanje vodika
	Gorivne celice in shranjevanje energije
	Laboratorij za obnovljive vire
	Laboratorijski tečaj tehniške kemije
Carinthia University of Applied Sciences	Inspiring and preparing the next generation for green energy – an educational concept

Več informacij o izobraževalnih ponudbah partnerjev H2GreenTech projekta (tečaji, predavanja, laboratorijski tečaji, delavnice, poletne šole, drugi dogodki) se nahaja v dokumentu [10].

## 6 Možnosti uporabe zelenega vodika

Še pred idejo o uporabi vodika kot sredstva za shranjevanje in prenos energije se je vodik uporabljal in se še uporablja za različne industrijske namene in sicer kot surovina, ki je vgrajena v materiale in izdelke ter kot sredstvo za različne načine obdelave materialov. V veliki večini se uporablja "sivi" vodik, pridobljen iz zemeljskega plina s pomočjo parnega reforminga, pri čemer nastajajo emisije CO<sub>2</sub>. Področja obstoječe uporabe vodika so razvidna iz tabele in jih najdemo tako v Avstriji, kot v Sloveniji:

Tabela 1: Trenutna uporaba vodika

Industrijsko področje	Namen
Kemijska industrija	Surovina za proizvodnjo amonijaka, vodikovega peroksida, umetnih gnojil in ostalo
Elektronska industrija	Kaljenje, popuščanje, litografija, epitaksija oziroma nanašanje tankih filmov, vgradnja v materiale elektronskih elementov
Petrokemijska industrija	Odstranjevanje žveplovih spojin iz ogljikovodikov pri proizvodnji naftnih derivatov
Železarska industrija	Hladilno sredstvo oziroma sredstvo z veliko toplotno prevodnostjo ali zaščitna atmosfera
Proizvodnja električne energije	Hlajenje turbinskih generatorjev

Zeleni vodik lahko torej nadomesti sivi vodik za področja uporabe gornje tabele. Uporaba vodika v energetske namene pa možnosti za uporabo zelenega vodika še močno razširi, kot sledi iz spodnje tabele.

Tabela 2: Prihodnja uporaba vodika

Sredstvo za shranjevanje in prenos energije	<p>Pretvorba in shranjevanje električne energije v vodik, pri čemer se vodik generira z elektrolizo vode, za elektrolizo pa se uporabi zelena elektrika. Shranjeni vodik se kasneje lahko uporabi na različne načine:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• gorivo za proizvodnjo toplote (v preteklosti se je redko uporabljal za ogrevanje zaradi visoke cene na kWh v primerjavi z zemeljskim plinom pred krizno situacijo)</li> <li>• gorivo za transport oziroma mobilnost (za vozila in naprave s pogonom na gorivne celice, kot so viličarji, manjša dostavna vozila, avtobusi, prvi primerki osebnih vozil)</li> <li>• pretvorba nazaj v elektriko</li> <li>• industrijska uporaba skladno z zgornjo tabelo</li> </ul>
---	---

**Trenutna uporaba vodika**

V Avstriji se trenutno proizvede 140.000 ton, v Sloveniji pa 2400 ton vodika na leto. V obeh državah se skoraj vsa količina proizvede s pomočjo parnega reforminga zemeljskega plina. Kot omenjeno, tovrstna proizvodnja vodika generira emisije CO<sub>2</sub>, ki izvirajo iz zemeljskega plina, ki se v procesu reforminga uporablja kot surovina in kot energent za proizvodnjo toplotne energije, ki jo zahteva proces. Zaradi emisij CO<sub>2</sub> se vodik, ki nastane s procesom reforminga, imenuje "sivi vodik".

V Sloveniji se približno 1200 t (48 GWh) vodika na leto porabi za proizvodnjo vodikovega peroksida. Negotova dobava zemeljskega plina in naraščajoče cene vodijo v razmere, ko zeleni vodik, proizveden s pomočjo elektrolize vode, postaja cenovno konkurenčen in ekonomsko upravičen. Prehod proizvodnje vodika iz reforminga zemeljskega plina na proizvodnjo s pomočjo elektrolize zato predstavlja velik potencial za uporabo zelenega vodika v Sloveniji. Ostalih 1200 t na leto pa se porabi za različne druge namene, kot je železarstvo, odstranjevanje kisika iz različnih procesov ter za proizvodnjo toplote v določenih proizvodnih procesih. Trenutna poraba vodika v Avstriji znaša 140.000 t (5,6 TWh) na leto in se uporabi v železarstvu in v kemijski industriji.

**Prihodnja uporaba vodika**

Velik potencial je uporaba vodika za proizvodnjo toplote pri visoki temperaturi v železarski, cementni, opekarski in steklarski industriji. Na primer, steklarske peči se trenutno napajajo z zemeljskim plinom in elektriko, želja je je del zemeljskega plina nadomestiti z vodikom. Demonstracijski projekti uporabe vodika so že bili izvedeni. Poraba toplotne moči v steklarski peči je v rangu 20 MW. Generiranje 10 % (2 MW) toplotne energije z vodikom pomeni porabo vodika 1500 t / leto (60 GWh / leto).

Naslednji obetaven potencial za Avstrijo in Slovenijo je uporaba vodika v transportu oziroma mobilnosti. Načelno se lahko vodik uporabi v vseh vrstah transporta (osebna vozila, tovorna vozila, avtobusi in tudi železnice). Uporaba za osebna in tovorna vozila je še problematična, ker ni na voljo razvejane polnilne infrastrukture za vodik in ker še ni na voljo pestre izbire osebnih in tovornih vozil s pogonom na vodikove gorivne celice. Idealna aplikacija mobilnosti so mestni avtobusi:

- celotna flota mestnih avtobusov se polni na eni namenski lokaciji, zato ni potrebna razvejana polnilna infrastruktura,
- zaradi ekonomskih razlogov morajo biti avtobusi čim večji delež časa v pogonu, daljši postanki npr. za polnjenje baterij, so nezaželeni,
- dnevna razdalja, ki jo opravijo mestni avtobusi, presega doseg baterij, zato baterijski pogon ni idealen za mestne avtobuse,
- avtobusi, ki za pogon uporabljajo vodikove gorivne celice, ne povzročajo nobenih emisij in ustvarjajo mnogo manj hrupa, kot obstoječi avtobusi z motorji z notranjim izgorevanjem
- pogonska goriva (Diesel) so močno obremenjena z okoljskimi in energetskimi dajatvami, kar rezultira v končni ceni v rangu 150 EUR/MWh, to pa je cena, pri kateri vodik že postane konkurenčen (glej poglavje 1) ob predpostavki, da ne bi bil obremenjen z omenjenimi dajatvami, pač pa le z DDV.

Uporaba vodika v mestnih avtobusih bi lahko bila tehnično ekonomsko upravičena že danes in bi lahko predstavljala prodor pri uporabi vodikovih tehnologij. Po grobi oceni en avtobus dnevno porabi 30 kg

## HYDROGEN CENTER

vodika ob predpostavljene tipičnem voznem ciklu, kar na leto predstavlja 10 ton vodika. Flota 100 mestnih avtobusov torej porabi 1000 ton vodika na leto.

Naslednji potencial v mobilnosti je železniški promet, predvsem proge, ki niso elektrificirane (takšnih je v Sloveniji cca. 600 km oziroma 50 % vseh prog). Na ne-elektrificiranih progah se izvaja vleka z lokomotivami na Dieselski pogon, ki povzročajo emisije in hrup, kar bi lahko rešili z uporabo lokomotiv s pogonom na vodik bodisi preko gorivnih celic bodisi preko plinskih turbinskih generatorjev.

Spodnja tabela kaže primerjavo porabe zemeljskega plina in vodika v Avstriji in Sloveniji. Podane so tudi grobe ocene porabe vodika v 2040.

Tabela 3: Trenutne potrebe po vodiku

	Avstrija	Slovenija
ŠT. PREBIVALCEV	8,9 mio	2,1 mio
ZEMELJSKI PLIN trenutna letna poraba	100 TWh	10,2 TWh
VODIK trenutna letna poraba	140.000 t (5,6 TWh)	2.400 t (96 GWh)
VODIK trenutna letna poraba na prebivalca	15,7 kg	1,2 kg
VODIK letna poraba v 2040	67-75 TWh (1.775.000 t)	1,14 TWh (28.500 t)
VODIK letna poraba v 2040 na prebivalca v 2040	199,4 kg	13,6 kg

Viri: [8], [13]

## 7 Možnosti za proizvodnjo zelenega vodika

Glavni način proizvodnje zelenega vodika je elektroliza vode, pri čemer je za pogon elektrolize potrebno uporabljati zeleno električno energijo, ta pa izvira iz treh glavnih primarnih virov: sončne elektrarne, vetrne elektrarne in hidroelektrarne. Če za pogon elektrolize uporabljamo elektriko iz omrežja iz mešanih virov, ki vključujejo termoelektrarne, je rezultat rumeni vodik, saj proizvodnja elektrike, ki poganja elektrolizo, generira CO<sub>2</sub>. Brez primarnih virov zelene električne energije torej proizvodnja zelenega vodika ni mogoča. Možnosti proizvodnje zelenega vodika so zato neposredno povezane z možnostmi proizvodnje zelene električne energije. Zeleni vodik je možno proizvajati iz viškov obstoječih virov zelene električne energije ali iz novo instaliranih virov zelene električne energije. Če bi vodik proizvajali iz obstoječih (že zakupljenih oziroma že rezerviranih) virov zelene električne energije, bi se obstoječi uporabniki zelene energije morali preusmeriti na ekološko manj prijazne vire (termoelektrarne), zato na nivoju države ne bi dosegli zmanjšanja emisij CO<sub>2</sub> in ostalih negativnih vplivov na okolje.

Glavno vprašanje tega poglavja je vprašanje, kakšni potenciali obstajajo za gradnjo novih virov zelene električne energije, to je novih sončnih, vetrnih in hidro elektrarn. Odgovor lahko podamo s pomočjo spodnje tabele:

Tabela 4: Trenutni in načrtovani viri zelene električne energije

Viri zelene električne energije		Avstrija	Slovenija
Hidro elektrarne	Obstoječe	38,4 TWh/leto	4,95 TWh/leto
	Potencial za novo	11 TWh/leto	1 TWh/leto
Vetrne elektrarne	Obstoječe	6,6 TWh/leto	Zanemarljivo
	Potencial za novo	5,4 – 15,8 TWh/leto	Ni znano
Sončne elektrarne	Obstoječe	1,27 TWh/leto	0,29 TWh/leto
	Potencial za novo	48 TWh/leto	7,28 TWh/leto

Vidimo lahko, da so možnosti za postavitev novih hidro elektrarn omejene v obeh državah. Razlog je v tem, da je hidro potencial že do dobra izkoriščen tako v Avstriji, kot v Sloveniji. V planu je postavitev dodatne letne proizvodnje 11 TWh v Avstriji in 1 TWh v Sloveniji. V Sloveniji je v planu postavitev novih desetih elektrarn na reki Savi s skupno letno proizvodnjo cca. 1000 GWh, vir: <https://www.gen-energija.si/investiramo-in-razvijamo/srednjesavske-elektrarne>.

Naslednja možnost so vetrne elektrarne. Avstrija je v tem pogledu zelo ambiciozna in planira postavitev dodatnih vetrnih elektrarn s proizvodno kapaciteto 5,4 – 15,8 TWh na leto. Javnost je v Sloveniji izrazito nenaklonjena umeščanju vetrnih elektrarn v prostor, rast števila vetrnih elektrarn v bližnji bodočnosti zato ni pričakovana.

Zelo atraktivna možnost so sončne elektrarne. V obeh državah jih je možno namestiti na strehe objektov, na parkirišča in na degradirane površine. Na primer v Sloveniji je skupna površina strešnih površin ocenjena na 270 mio m<sup>2</sup> [9]. Ob tipični osončenosti v Avstrijsko-Slovenski regiji fotovoltaični

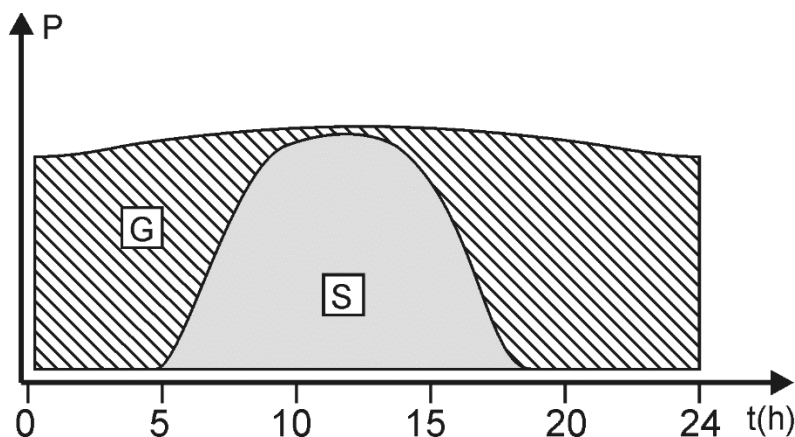
## HYDROGEN CENTER

panel s konično močjo  $125 \text{ W/m}^2$  proizvede  $135 \text{ kWh/m}^2$  električne energije na leto. Zmnožek skupne površine streh z energijo, ki jo na letni bazi proizvede fotovoltaični panel s površino  $1 \text{ m}^2$  predstavlja skupno proizvedeno energijo v enem letu ( $36,4 \text{ TWh}$ ) v Sloveniji. Pokritje vseh streh s fotovoltaičnimi paneli je zelo nerealistična predpostavka. Če bi uporabili 20 % strešnih površin, bi lahko proizvedli  $7,28 \text{ TWh}$  električne energije letno, kar bi lahko uporabili za razogljčenje raznih procesov in sektorjev bodisi z direktno elektrifikacijo bodisi po poti vodikovih tehnologij.

Pri oceni možnosti proizvodnje zelenega vodika je potrebno upoštevati tudi stroškovni vidik, saj želimo vodik proizvajati s čim nižjimi stroški. Iz poglavja 1 izhaja, da lahko stroške proizvodnje zelenega vodika znižamo na dva glavna načina:

- z zagotovitvijo čim nižje cene zelene električne energije, ki poganja proces elektrolize
- z visoko stopnjo izkoriščenosti elektrolizerja (z minimizacijo intervalov, ko elektrolizer ne deluje)

Cena zelene električne energije, ki se uporablja za pogon elektrolize, ima neposreden vpliv na končno proizvodno ceno vodika, kot sledi iz poglavja 1. Cena električne energije je v splošnem sestavljena iz naslednjih komponent: cena energije, cena prenosa, dajatve in davki. V Sloveniji cena prenosa, dajatve in davki predstavljajo preko 50 % celotnega računa za električno energijo, sama cena električne energije pa je predmet dnevnih nihanj in borznih špekulacij. S tega stališča je smotrno elektrolizo priključiti direktno na sončno elektrarno in se s tem izogniti stroškom prenosa energije ter dajatvam. Vendar je v tem primeru stopnja izkoriščenosti elektrolizerja nizka, razlog je v tem, da je električna energija iz sončne elektrarne na voljo le omejen čas v dnevu. Optimalna rešitev je kombinirano napajanje direktno iz sončne elektrarne, kadar osončenost to omogoča (dnevni čas) in napajanje iz omrežja, kadar je osončenost nezadostna, v omrežju pa so na voljo viški cenene energije (nočni čas). Razmere pojasnjuje Slika 3. Na ta način dosežemo visoko stopnjo izkoriščenosti elektrolizerja in hkrati nizko povprečno ceno električne energije, kar omogoča minimizacijo proizvodnih stroškov vodika.



Slika 3: Primer proizvodnje zelenega vodika tekom dneva (S-električna moč iz fotovoltaike, G-električna moč iz omrežja)

## 8 Proizvodni stroški zelenega vodika

Proizvodna cena vodika ključno vpliva na njegovo konkurenčnost z obstoječimi gorivi in surovinami. Lastna cena vodika se sestoji iz treh glavnih komponent:

PC1	Cenovna komponenta, ki izvira iz investicijskih stroškov (CAPEX) v opremo (elektrolizer, hranilnik vodika in pripadajoča oprema). Prispevek te komponente k ceni vodika je močno odvisen od stopnje izkoriščenosti opreme in njene življenjske dobe.
PC2	Cenovna komponenta, ki izvira iz obratovalnih stroškov (OPEX), kot je strošek delovne sile, strošek vzdrževanja opreme in strošek materialov, ki se porabljajo med obratovanjem.
PC3	Cenovna komponenta, ki izvira iz cene električne energije, ki se porablja za proizvodnjo vodika. Glavni del predstavlja poraba elektrolizerja (tipično 55 kWh / kg H <sub>2</sub> ), a imajo tudi ostale komponente električno porabo (ocena 5 kWh / kg H <sub>2</sub> ).

Predpostavimo sistem za proizvodnjo vodika z elektrolizerjem z električno močjo 1 MW:

<b>CAPEX:</b> Investicija (projektna dokumentacija, elektrolizer, visokotlačni hranilnik vodika, pomožne komponente, električni priklop, gradbena in montažna dela, kontrolni sistem)	2.500.000 EUR
<b>OPEX:</b> Ocenjen pavšalno kot 5% od CAPEX vsako leto	125.000 EUR/leto
Dejanska izkoriščenost razpoložljive proizvodne kapacitete sistema	80 %
Pričakovana življenjska doba sistema	15 let
Proizvodna kapaciteta sistema pri polni moči	20 kg H <sub>2</sub> / h
Poraba sistema pri polni moči	55 kWh / kg H <sub>2</sub>

### Cenovna komponenta PC1

Cenovna komponenta PC1 se izračuna kot kvocient stroškov CAPEX in skupno maso proizvedenega vodika tekom življenjske dobe sistema:

$$PC1(\text{EUR}/\text{kg}) = \frac{\text{CAPEX}}{m_{TOT}}$$

Masa proizvedenega vodika tekom življenjske dobe sistema:

$$m_{TOT} = 20 \text{ kg/h} * 24 \text{ h/dan} * 365 \text{ dni/leto} * 15 \text{ let} * 80 \% = 2.102.400 \text{ kg}$$

Iz tega izhaja cenovna komponenta PC1:

$$PC1 = \frac{2.500.000 \text{ EUR}}{2.102.400 \text{ kg}} = 1,19 \frac{\text{EUR}}{\text{kg}}$$

### Cenovna komponenta PC2

Cenovna komponenta PC2 se izračuna kot kvocient stroškov OPEX in skupno maso proizvedenega vodika tekom življenjske dobe sistema:

$$PC2 \left( \frac{EUR}{kg} \right) = \frac{OPEX}{m_{TOT}} = \frac{15 * 125.000 EUR}{2.102.400 kg} = 0,89 \frac{EUR}{kg}$$

### Cenovna komponenta PC3

Komponenta PC3 predstavlja strošek električne energije za proizvodnjo zelenega vodika in je neposredno odvisna od cene električne energije (EUR/MWh) in porabe sistema (55 kWh / kg H<sub>2</sub>):

$$PC3 \left( \frac{EUR}{kg} \right) = \text{Cena elektrike} \left( \frac{EUR}{MWh} \right) * 0,001 * \text{Električna poraba sistema} \left( \frac{kWh}{kg} \right)$$

### Skupna cena vodika

Skupna proizvodnja cena je vsota vseh treh komponent (PC1+PC2+PC3) in je izražena v EUR / kg H<sub>2</sub>.

Upoštevajoč energijsko vrednost vodika (HHV = 39,39 kWh/kg) lahko ceno vodika izrazimo v EUR / MWh, kar je relevantno za aplikacije, kjer se vodik uporablja kot energent.

$$PC3 \left( \frac{EUR}{MWh} \right) = PC3 \left( \frac{EUR}{kg} \right) * \left( HHV_{H_2} \left( \frac{kWh}{kg} \right) \right)^{-1} * 1000$$

Tabela 5: Cena vodika v odvisnosti od cene elektrike

Primer	Cena električne energije (EUR/MWh)	PC1 CAPEX (EUR/kg)	PC2 OPEX (EUR/kg)	PC3 Električna (EUR/kg)	Skupna cena vodika (EUR/kg)	Skupna cena vodika (EUR/MWh)
1	30	1,19	0,89	1,65	<b>3,73</b>	<b>94,69</b>
2	60	1,19	0,89	3,30	<b>5,38</b>	<b>136,58</b>
3	120	1,19	0,89	6,60	<b>8,68</b>	<b>220,36</b>
4	180	1,19	0,89	9,90	<b>11,98</b>	<b>304,14</b>

Davek na dodano vrednost (DDV) in ostale dajatve niso upoštevane

### Opombe

- S sofinanciranjem ali olajšavami pri nabavi in montaži opreme (CAPEX) je možno skupno ceno vodika znižati, maksimalni potencial znižanja je 1,19 EUR/kg, kolikor znaša cenovna komponenta PC1.
- Za nadaljnja znižanja cene vodike bi bilo treba upoštevati sofinanciranja obratovalnih stroškov (OPEX) in cene električne energije za proizvodnjo vodika.

## 9 Vodikove tehnologije za balansiranje elektro-energetskega sistema

Sistemski operater elektroenergetskega sistema neprestano zagotavlja, da proizvodnja električne energije sovпада s porabo. Sistemski operater glede na napovedano bodočo porabo določa potek moči posameznih elektrarn. Navkljub skrbi za skladnost se vseeno pojavljajo razlike med proizvodnjo in porabo, razlogi so naslednji:

- odstopanje proizvodnje posameznih elektrarn od plana zaradi tehničnih težav,
- odstopanje porabe večjih porabnikov od plana zaradi izpadov iz različnih razlogov,
- odvisnost proizvodnje električne energije iz obnovljivih virov (sončne, vetrne in hidro elektrarne) od letnega časa, obdobja v dnevu in vremena in posledična nezmožnost sledenja dejanskim potrebam po električni energiji.

Odstopanja sistemski operater rešuje med drugim s sistemskimi storitvami, ki vsebujejo primarno, sekundarno in terciarno regulacijo:

- Primarna regulacija je regulacija frekvence izmenične napetosti, izvajajo jo elektrarne in poteka avtomatsko ves čas obratovanja posamezne elektrarne.
- Sekundarna regulacija služi za izravnavo večjih odstopanj med proizvodnjo in porabo, proži jo sistemski operater, izvajajo pa jo predhodno izbrani izvajalci. Ti morajo na zahtevo oziroma na signal sistema operaterja povečati moč proizvodnje ali zmanjšati odjem, če gre za pozitivno regulacijo. Pri negativni regulaciji pa morajo povečati odjem ali zmanjšati proizvodnjo. Predpisani odzivni čas na zahtevo sistema operaterja je v rangu sekund, trajanje pa je do 15 minut. Potrebe za celotno Slovenijo znašajo 60 MW za pozitivno sekundarno regulacijo in 60 MW za negativno sekundarno regulacijo. Plačilo izvajalcem je sestavljeno iz dveh postavk: plačilo za pripravljenost in plačilo dejansko dobavljene električne energije (borzni cena, povečana za določen faktor).
- Terciarna regulacija služi za izravnavo dalj časa trajajočih izpadov elektrarn. Aktivacija ni avtomatska ampak ročna. Največja pozitivna moč je enaka moči največje elektrarne. Največja negativna moč je enaka moči največjega porabnika (ČHE Avče). Podobno, kot pri sekundarni regulaciji, so izvajalci plačani za pripravljenost in za dejansko dobavljeno električno energijo.

Elektrolizer, ki proizvaja vodik za končne porabnike (npr. za pogon mestnih avtobusov) in se napaja iz omrežja, bi bilo možno vključiti v sekundarno regulacijo. V normalnih razmerah, ko ni zahteve za aktivacijo, elektrolizer deluje z nazivno močjo delovanja. Ko se pojavi zahteva za aktivacijo pozitivne regulacije in s tem za dovajanje dodatne moči v omrežje, se proizvodnja vodika in s tem električna moč elektrolizerja zmanjša, kar ima enak učinek, ko dovajanje dodatne moči v omrežje. Profitabilnost elektrolizerja se lahko na račun vključitve v sekundarno regulacijo poveča:

- vsak MW rezervirane moči prinaša dodatni letni dohodek
- dejansko dobavljena električna energija prinaša dodaten dohodek, če je izpolnjen naslednji pogoj:

Cena električne energije,  
dovedene v omrežje > Prodajna cena vodika (EUR/kg H<sub>2</sub>) / Poraba elektrolizerja (kWh/kg H<sub>2</sub>) - Cena elektrike, porabljene iz omrežja (EUR/kWh)  
(EUR/kWh)

## HYDROGEN CENTER

Iz tabele spodaj je razviden dobiček iz proizvodnje vodika po petnajstih letih obratovanja. Levi stolpec predstavlja situacijo, ko je elektrolizer vključen v sekundarno regulacijo, pri čemer se 90 % električne energije porabi za proizvodnjo vodika, 10 % pa predstavlja aktivacijo sekundarne regulacije. Desni stolpec predstavlja situacijo, ko elektrolizer ni vključen v shemo sekundarne regulacije in deluje neodvisno, pri čemer se vsa električna energija porabi za proizvodnjo vodika.

Tabela 6: Učinek sodelovanja v sekundarni regulaciji

Parametri	90 % energije za proizvodnjo vodika, 10 % za sekundarno regulacijo	100 % energije za proizvodnjo vodika, brez nujenja sekundarne regulacije	Enota
CAPEX investicija	2.500.000,00	2.500.000,00	EUR
OPEX kot % od CAPEX na leto	5,00	5,00	%
OPEX na leto	125.000,00	125.000,00	EUR
Električna poraba elektrolizerja	0,0550	0,0550	MWh/kg H2
Cena elektrike (elektrika za proizvodnjo vodika)	100,00	100,00	EUR/MWh
Cena elektrike (elektrika dobavljena času sek. reg.)	250,00	250,00	EUR/MWh
Prodajna cena vodika	10,00	10,00	EUR/kg
Povprečna električna moč proizvodnje vodika	<b>0,90</b>	<b>1,00</b>	MW
Povprečna električna sekundarne regulacije	<b>0,10</b>	<b>0,00</b>	MW
Moč rezervirana za sekundarno regulacijo	1,00	0,00	MW
Dohodek iz sekundarns regulacijs (za pripravljenost)	<b>183.000,00</b>	<b>0,00</b>	EUR/(MW*leto)
Doba opazovanja	15,00	15,00	leto
<b>Vmesni rezultati</b>			
Količina proizvedenega vodika	2.150.181,82	2.389.090,91	kg
Energija proizvodnje vodika	118.260,00	131.400,00	MWh
Energija sekundarne regulacije	13.140,00	0,00	MWh
<b>Stroški</b>			
Strošek - CAPEX	2.500.000,00	2.500.000,00	EUR
Strošek - OPEX	1.875.000,00	1.875.000,00	EUR
Strošek elektrike za proizvodnjo vodika	11.826.000,00	13.140.000,00	EUR
<b>Skupaj</b>	<b>16.201.000,00</b>	<b>17.515.000,00</b>	EUR
<b>Prihodki</b>			
Prihodek od prodaje vodika	21.501.818,18	23.890.909,09	EUR
Prihodek od dobave elektrike v času sekundarne regulacije	3.285.000,00	0,00	EUR
Prihodek od pavšala za sekundarno regulacijo	2.745.000,00	0,00	EUR
<b>Skupaj</b>	<b>27.531.818,18</b>	<b>23.890.909,09</b>	EUR
<b>Dobiček=Prihodki-Stroški</b>	<b>11.330.818,18</b>	<b>6.375.909,09</b>	EUR

Drug način vključitve v balansiranje elektro-energetskega sistema je preko shranjevanja električne energije. V obdobjih, ko je proizvodnja iz obnovljivih virov visoka (poletni dnevi ob lepem vremenu) nastajajo viški poceni električne energije, ki jih je smiselno shraniti in uporabiti v obdobjih povečane porabe in zmanjšane proizvodnje ter višjih cen električne energije. To se izvaja s pomočjo črpalnih elektrarn, ki energijo shranjujejo v obliki potencialne energije vode, problem pa je, da tovrstno shranjevanje pomeni velik poseg v prostor, kapaciteta shranjevanja pa je omejena. Druga možnost so baterije, a so primerne le za kratkotrajno shranjevanje malih količin energije. Potencialno uporabne so tudi vodikove tehnologije. Viški električne energije se s pomočjo elektrolize vode pretvorijo v vodik,

## HYDROGEN CENTER

ki se shrani. V času primanjkljajev pa se lahko shranjeni vodik s pomočjo gorivnih celic ali plinskih turbinskih generatorjev pretvori nazaj v električno energijo, ali pa se ga uporabi za druge namene.

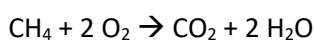
Shranjevanje energije v vodik ni idealna tehnologija shranjevanja energije, celotni izkoristek "polnilno-praznilnega cikla" znaša okrog 35 %, kar pomeni, da če v hranilnik dovedemo 1 MWh električne energije in jo shranimo, potem hranilnik vrne 0,35 MWh električne energije. Naslednji izziv je shranjevanje vodika. Vodik sicer vsebuje veliko energije na enoto mase (39,39 kWh/kg), hkrati pa zaradi izjemno nizke specifične mase zavzema veliko prostora v hranilniku, kar je mogoče zmanjšati s komprimiranjem na visok tlak (50...300 bar). Visok tlak shranjevanja pa zahteva visoko mehansko trdnost rezervoarja, komprimiranje pa porablja energijo, kar negativno vpliva na končni izkoristek shranjevanja.

Kapaciteto shranjevanja (količino shranjenih MWh) povečujemo s večanjem volumna rezervoarja ali z večanjem števila rezervoarjev. Multiplikacija kapacitete shranjevanja sicer multiplicira stroške rezervoarja, stroški pretvornikov (elektrolizer in gorivna celica) pa ostanejo enaki. Zato cena shranjevanja v odvisnosti od kapacitete narašča počasneje, kot pri baterijah, pri katerih je povezava med kapaciteto in ceno približno linearna.

Zaradi zmožnosti shranjevanja energije so torej vodikove tehnologije primerne za balansiranje elektro-energetskega sistema, kar potrjuje tudi znanstvena in strokovna literatura. Zaradi nizke izkoristka polnilno-praznilnega cikla se shranjevanje v vodik ekonomsko izplača le pri zelo velikih razlikah v ceni električne energije.

## 10 Okoljske prednosti uporabe zelenega vodika

Skladno z Zelenim dogovorom EU in predlogom "Pripravljeni na 55" je EU zastavila cilj doseči podnebno nevtralnost do leta 2050. Kot vmesni korak k podnebni nevtralnosti se je EU zavezala, da bo do leta 2030 zmanjšala emisije za vsaj 55 %. V EU vodikovi strategiji je vodik je opredeljen kot nosilec energije za podnebno nevtralno gospodarstvo. Zeleni vodik, ki izvira iz obnovljivih virov električne energije, lahko postopno in delno nadomešča fosilna goriva, kot so zemeljski plin, kurilna olja in premogi. Opuščanje fosilnih goriv neposredno prinaša okoljske prednosti, ki se izražajo predvsem v zmanjšanju emisij CO<sub>2</sub> ter drugih škodljivih spojin, ki nastajajo predvsem pri uporabi premogov in kurilnih olj, to so CO, žveplove spojine, NO<sub>x</sub>, trdni delci in številna druga onesnaževala. V tem poglavju se bomo posvetili potencialom za zmanjšanje emisij CO<sub>2</sub>. Za oceno možnosti zmanjševanja izpustov najprej navajamo osnovne relacije in podatke. Masno bilanco zgorevanja zemeljskega plina, ki ga aproksimiramo z metanom (CH<sub>4</sub>) podaja naslednja relacija:



Iz relacije sledi, da 1 mol CH<sub>4</sub> generira 1 mol CO<sub>2</sub>. Molske mase za CH<sub>4</sub> in CO<sub>2</sub> so: M<sub>CH<sub>4</sub></sub> = 16,04 g/mol in M<sub>CO<sub>2</sub></sub> = 44,01 g/mol. Zgornja in spodnja energijska vrednost zemeljskega plina oziroma metana (CH<sub>4</sub>) znaša:

HHV <sub>CH<sub>4</sub></sub> : 15,4 kWh/kg	55,5 MJ/kg	39,8 MJ/m <sup>3</sup>
LHV <sub>CH<sub>4</sub></sub> : 13,9 kWh/kg	50,0 MJ/kg	35,8 MJ/m <sup>3</sup>

Energijska vrednost za vodik pa znaša:

HHV <sub>H<sub>2</sub></sub> : 39,39 kWh/kg	141,80 MJ/kg	12,7 MJ/m <sup>3</sup>
LHV <sub>H<sub>2</sub></sub> : 33,32 kWh/kg	119,96 MJ/kg	10,8 MJ/m <sup>3</sup>

Zanima nas emisija CO<sub>2</sub> pri zgorevanju takšne količine metana, ki ustreza energiji 1 MWh. Najprej izračunamo maso metana za 1 MWh, pri čemer upoštevamo energijsko vrednost LHV<sub>CH<sub>4</sub></sub> = 13,9 kWh/kg:

$$m_{\text{CH}_4} = \text{Energija (kWh)} / \text{LHV}_{\text{CH}_4} (\text{kWh/kg}) = 1000 \text{ kWh} / 13,9 \text{ kWh/kg} = 71,94 \text{ kg}$$

Iz mase izračunamo množino (število molov) metana:

$$n_{\text{CH}_4} = m_{\text{CH}_4} (\text{kg}) \times (1000 \text{ g/kg}) / M_{\text{CH}_4} (\text{g/mol}) = 71,94 \times 10^3 \text{ g} / 16,4 \text{ g/mol} = 4386,73 \text{ mol}$$

Kot omenjeno zgoraj, je število molov CO<sub>2</sub>, ki nastanejo pri zgorevanju metana, enako številu molov metana (n<sub>CH<sub>4</sub></sub> = n<sub>CO<sub>2</sub></sub> = 4386,73 mol). Končno izračunamo maso emisij CO<sub>2</sub> iz števila molov in molske mase:

$$m_{\text{CO}_2} = n_{\text{CO}_2} \times M_{\text{CO}_2} = 4386,73 \text{ mol} \times 44,01 \text{ g/mol} \times 0,001 \text{ kg/g} = 193,06 \text{ kg}$$

Iz tega sledijo glavni povzetki:

- Zgorevanje metana energijske vrednosti 1 MWh generira 193 kg CO<sub>2</sub>.
- Zgorevanje metana mase 1 kg generira 2,68 kg CO<sub>2</sub>.
- Iz energijskih vrednosti metana in vodika izhaja, da je 1 kg metana mogoče nadomestiti z 0,39 kg vodika.

Na podoben način se izračunajo tudi emisije CO<sub>2</sub> za kurilna olja in premoge.

Tabela spodaj prikazuje letno porabljeno fosilno energijo v Avstriji in Sloveniji, ki bi v prihodnosti lahko bila nadomeščena z direktno elektrifikacijo, obnovljivimi gorivi in vodikom.

Tabela 7: Struktura in količine trenutne porabe fosilnih energetskih virov za Avstrijo in Slovenijo:

Dobavljena energija	Avstrija	Slovenija	
Premog	27,59	12,22	TWh
Zemeljski plin	84,89	8,55	TWh
Naftni derivati	124,28	21,98	TWh

V nadaljevanju obravnavamo potencialne znižanja emisij CO<sub>2</sub> v posameznih konkretnih primerih:

**Primer 1:** Nadomeščanje zemeljskega plina z zelenim vodikom (dodajanje vodika v plinovodno omrežje)

Letna poraba zemeljskega plina v Sloveniji v 2020 je cca. 10,2 TWh, oziroma 675.000 ton/letno, kar prispeva 1,85 Mio ton izpustov CO<sub>2</sub>/letno, oziroma okrog 11 % vseh emisij CO<sub>2</sub> v Sloveniji. Porabniki zemeljskega plina so v večini negospodinjiski uporabniki (industrija, energetika, ogrevanje, ...). Če zeleni vodik dodajamo v plinovodno omrežje in z njim nadomestimo 5 % masnega pretoka zemeljskega plina, pri čemer ohranimo energijski pretok, zmanjšamo emisije CO<sub>2</sub> z naslova zgorevanja zemeljskega plina za 5 %. Za ohranitev energijskega toka ob 5 % manjšem masnem pretoku zemeljskega plina potrebujemo dnevno proizvodnjo zelenega vodika okrog 40 ton/dnevno. Za dodajanje vodika je v plinovodnem omrežju potrebno dograditi mešalno regulacijsko postajo za vodik. V primeru večjih deležev vodika v plinovodnem omrežju se lahko pojavijo potrebe po modifikaciji merilno-regulacijskih sistemov pri končnih uporabnikih plina.

Možna je preureditev industrijske energetike iz uporabe zemeljskega plina na uporabo zelenega vodika. V tem primeru je potrebna nabava elektrolizerja ustrezne moči (ali več elektrolizerjev) s pripadajočo opremo za kondicioniranje, komprimiranje, shranjevanje in distribucijo zelenega vodika.

Z dovajanjem vodika v plinovodno omrežje do 5% lahko zmanjšamo emisije CO<sub>2</sub> do 93.000 ton/letno.

**Primer 2:** Nadomestitev rabe fosilnih goriv (premog, nafta, plin) v predelovalni industriji z zelenim vodikom

Poraba energije v slovenski industriji je velika. V letu 2020 je industrija porabila 14,6 TWh energije. Če predstavljata elektrika in fosilna goriva glavna energenta v industriji in si delež delita na polovico, torej odpade na fosilna goriva okrog 7 TWh porabljene energije – okrog 500.000 ton fosilnih goriv. Z zamenjavo 10 % rabe fosilnih goriv z zelenim vodikom bi slovenska industrija lahko zmanjšala emisije CO<sub>2</sub> za okrog 150.000 ton/letno.

**Primer 3:** Uporaba zelenega vodika v transportu

Transport je največji porabnik fosilnih goriv v Sloveniji in predstavlja letno okrog 18,5 TWh porabljene energije – okrog 1,5 Mio ton. Z zamenjavo 10 % voznega parka (predvsem mestni in primestni avtobusi ter tovorna vozila) z vodikovimi vozili bi se emisije CO<sub>2</sub> na račun transporta zmanjšale za okrog 480.000 ton/letno.

**Primer 4:** Uporaba zelenega vodika v industriji v Avstriji

## HYDROGEN CENTER

Industrijske emisije CO<sub>2</sub> v Avstriji so ocenjene na 28,4 milijona ton v letu 2020 [15]. Največ prispevajo železarska in jeklarska industrija z 11,3 milijona ton CO<sub>2</sub>, druge industrije (emisije, povezane s porabo energije) 9,2 milijona ton CO<sub>2</sub>, mineralna industrija (npr. cement) 2,9 milijona ton CO<sub>2</sub> in rafinerije z 2,8 milijona ton CO<sub>2</sub>. Nadomestitev uporabe zemeljskega plina ali sivega vodika z zelenim vodikom v obsegu 10 % lahko tako prispeva k zmanjšanju industrijskih emisij CO<sub>2</sub> za 2,8 milijona ton letno.

### Primer 5: Uporaba zelenega vodika za transport v Avstriji

V sektorju transporta naj bi se težki cestni promet nadgradil z mešanico novih tehnologij; od teh naj bi jih bilo 55 % povezanih z vodikom [16]. Danes je delež porabe energije v prometu iz fosilnih goriv v Avstriji približno 36,1 %. Emisije iz lahkih vozil so znašale 14,9 milijona ton CO<sub>2</sub>, iz težkih vozil pa približno 8,7 milijona ton CO<sub>2</sub>. Zamenjava 10 % prometnih zmogljivosti z vozili na vodik bi prispevala k zmanjšanju emisij CO<sub>2</sub> za 2.360.000 ton letno.

## 11 Možnosti zmanjšanja odvisnosti od uvoza fosilnih goriv

Evropske države vključno z Avstrijo in Slovenijo so močno odvisne od tujih energetskih virov, ki so pretežno fosilni viri (premog, naftni derivati in zemeljski plin). Z nadomestitvijo teh virov z zelenim vodikom se zmanjša odvisnost od uvoza od tujih dobaviteljev, hkrati pa se zmanjša obremenitev okolja s CO<sub>2</sub>, kot sledi iz poglavja 10.

Tabela 8: Struktura in količine energetskih virov za Avstrijo in Slovenijo:

Dobavljena energija	Avstrija	Slovenija	
Premog	27,59	12,22	TWh
Zemeljski plin	84,89	8,55	TWh
Jedrska energija	0,00	19,25	TWh
Vodna energija	42,00	4,93	TWh
Vetrna, sončna energija	11,14	0,67	TWh
Bio goriva in odpadki	73,36	8,83	TWh
Naftni derivati	124,28	21,98	TWh
<b>SKUPAJ</b>	<b>363,26</b>	<b>76,44</b>	<b>TWh</b>

vir <https://www.iea.org/countries>

Nadomestitev z vodikom	Avstrija	Slovenija	
Premog	10%	10%	
Zemeljski plin	10%	10%	
Naftni derivati	10%	10%	

Potreba po vodikom	Avstrija	Slovenija	
Vodik (energija)	23,68	4,28	TWh
Vodik (masa)	430.477,27	77.734,85	t
Elektroliza - izkoriščenost	0,80	0,80	
Elektroliza - instalirana moč	3378,46	610,08	MW

Tabela prikazuje situacijo, kjer delež (10 %) fosilnih virov energije nadomestimo z zelenim vodikom, pridobljenim iz zelene obnovljive električne energije. Iz tabele sledi, da je za nadomestitev 10 % energije iz fosilnih goriv potrebno proizvesti 430.000 ton vodika v Avstriji in 78.000 ton vodika v Sloveniji. To zahteva instalacijo elektrolizerjev moči 3,4 GW v Avstriji in 0,61 GW v Sloveniji pod predpostavko, da je njihova stopnja izkoriščenosti 80 %.

Potrebno električno energijo za delovanje elektrolizerjev je potrebno zagotoviti iz novo-zgrajenih obnovljivih virov (sončne, vetrne in hidro elektrarne). Iz tabele v poglavju 1 sledi, da planirani novi viri (sonce, hidro in veter) v obeh državah zadoščajo za nadomestitev 10 % energije iz fosilnih virov.

## 12 Zakonodaja

Za učinkovito in hitro uvajanje različnih tipov vodikovih sistemov je potrebna preglednost in učinkovitost na področju zakonodaje in varnostnih predpisov. Postopki za pridobitev dovoljenj morajo biti jasni in izvedljivi v razumno kratkem času ter po možnosti na enem mestu. Hkrati pa mora biti zagotovljena varnost obratovanja vodikovih sistemov.

V ta namen je potrebno je vnaprej pripraviti vzorčne postopke za različne kategorije vodikovih sistemov, kot so:

- Elektrolizerji
- Gorivne celice
- Tlačni hranilniki vodika različnih volumnov in različnih tlakov
- Sistemi za dodajanje vodika v obstoječa plinovodna omrežja
- Cevovodi za transport vodika pri različnih tlakih
- Vodikove črpalke za polnjenje vozil (samostojne ali umeščene v obstoječe bencinske črpalke)
- Vodikovi sistemi dograjeni k sončnim elektrarnam
- Vodikovi sistemi za preskrbo industrijskih objektov
- Vodikovi sistemi za lokalne energetske skupnosti za preskrbo naselja stanovanjskih objektov
- Vodikovi sistemi za individualne stanovanjske objekte ter umestitev v oziroma ob objekte
- Vodikovi sistemi za balansiranje elektro energetskega sistema

Treba je določiti varnostne pogoje, katerim morajo zadoščati osnovni elementi vodikovih tehnologij (elektrolizerji, gorivne celice, tlačni hranilniki). Sem spadajo predpisi, ki jih morajo upoštevati proizvajalci elementov pri konstrukciji in testi, ki jih morajo proizvajalci opraviti po proizvodnji (končna kontrola kvalitete in varnosti).

Potrebno je določiti režim periodičnih tehničnih in varnostnih pregledov posameznih kategorij vodikovih sistemov.

Z varnostnega stališča je posebej obravnavati tiste elemente vodikovih sistemov, ki vsebujejo večje količine shranjenega vodika, ki lahko predstavlja potencialno nevarnost, sem spadajo v prvi vrsti hranilniki vodika in cevovodi. Opredeliti je treba:

- varnostne predpise, katerim morajo zadoščati (materiali, oblika, varnostni testi),
- dovoljene načine in mesta vgradnje,
- potrebno varnostno opremo, kot so detektorji uhajanja vodika in prezračevalni sistemi.

V Sloveniji trenutno ni specifičnih predpisov za vodikove sisteme. Uporablja se zakonodaja za kemijske industrijske objekte in zakonodaja za tehnične pline. To vodi v relativno kompleksne in dolgotrajne postopke umeščanja vodikovih sistemov v prostor in v objekte.

Avstrija in Slovenija si bosta v skladu z revidirano uredbo TEN-E [14] prizadevali za pripravo predpisov in smernic za uvajanje storitev in infrastrukture vodikovih tehnologij s ciljem razogljčenja in zmanjšanja odvisnosti od uvoza fosilnih goriv. Revidirane smernice za vseevropska energetska omrežja (uredba TEN-E) prispevajo k razogljčenju evropske električne in plinske infrastrukture, hkrati pa zagotavljajo povezovanje sektorjev in trgov, zanesljivost oskrbe in konkurenco. Na ta način bo možen



## HYDROGEN CENTER

zagon novih projektov s področja proizvodnje, shranjevanja, transporta in uporabe vodika. V tem sklopu je predvidena uvedba proizvodnje vodika s pomočjo elektrolize in nadgradnja obstoječe plinske infrastrukture za uporabo vodika ter ostalih obnovljivih plinov in uvedba sistemov za shranjevanje plina oziroma energije.



Ta projekt sofinancira Evropski sklad za regionalni razvoj v okviru programa sodelovanja Interreg V-A Slovenija-Avstrija. <sup>1</sup>

## 13 Sodelovanje med sektorji

Uvajanje vodikovih tehnologij v večjem obsegu pomeni znaten finančni zalogaj, saj se investicije v vodikove sisteme moči ranga MW nahajajo v razponu nekaj mio EUR. Zaradi velikih investicij je potrebno že v fazi načrtovanja poskrbeti za finančno vzdržnost projektov, kar pa je odvisno od okoliščin v celotni verigi, v katero je umeščen vodikov sistem ter se prične v sektorju proizvodnje zelene električne energije in zaključi v sektorju končnih uporabnikov vodika. Pri uvajanju vodikovih sistemov je potrebno obravnavati in optimizirati celotno verigo.

Razmere pojasnimo s primerom proizvodnje zelenega vodika in dodajanje v obstoječe plinovodno omrežje.

Pri tovrstnem scenariju nastopajo subjekti iz številnih področij oziroma sektorjev gospodarstva, ki tvorijo dobaviteljsko in prenosno verigo, ki poteka od zagotovitve energije za proizvodnjo zelenega vodika pa do končnega uporabnika zelenega vodika. Sledijo v naslednjem vrstnem redu: 1. proizvajalci (zelene) električne energije za proizvodnjo vodika, 2. podjetja za prenos in distribucijo električne energije, 3. proizvajalci zelenega vodika, 4. plinovodi, ki omogočijo dodajanje vodika v njihovo omrežje zemeljskega plina in prenos do končnih uporabnikov, 5. podjetja, ki se ukvarjajo s prodajo zemeljskega plina in 6. končni uporabniki zemeljskega plina (industrija, gospodinjski odjem, ipd.). Iz navedenega primera vidimo, da je kompletna veriga zelo obsežna. Da bi bil projekt uspešen, morajo vsi člani v verigi prepoznati svojo ekonomsko računico in vsi morajo izpolniti svoj del tehničnih pogojev za integracijo v skupni sistem. K navedenim šestim subjektom lahko dodamo še 7. subjekt, to je država, ki ima vlogo pri pripravi zakonodaje ter upravnih postopkov, ki vodijo k izdaji dovoljenj za postavitve vodikovih sistemov. Država mora sprejeti strategijo uvajanja vodikovih tehnologij in pripraviti finančne instrumente za spodbujanje investicij v vodikove tehnologije, kot tudi za pokrivanje finančne vrzeli, ki lahko nastaja kot posledica visokih tržnih cen zelene elektrike, potrebne za proizvodnjo zelenega vodika. V nadaljevanju kratko analiziramo položaj posameznih členov v verigi proizvodnje in uporabe zelenega vodika.

Proizvajalci zelene električne energije lahko v času priprave tega dokumenta (2. kvartal 2022) svojo električno energijo na trgu prodajo po izjemno visokih cenah. Če bi te cene vgradili v proizvodno ceno zelenega vodika, bi bil ta nekonkurenčen ostalim energentom, navkljub dejstvu, da se tudi cena ostalih energentov v tem obdobju viša. V danem obdobju visokih cen elektrike bi bila potrebna subvencija zelene električne energije, kar bi omogočilo ohraniti proizvodne stroške zelenega vodika na sprejemljivem nivoju.

Podjetja za prenos in distribucijo električne energije oziroma operaterji prenosnega in distribucijskega elektro omrežja imajo v dani verigi funkcijo transporta zelene električne energije od izvorov (tipično sončne elektrarne) do lokacije proizvodnje vodika, kjer je instalirana oprema za elektrolizo (elektrolizer). Operaterji elektro omrežja k skupni ceni elektrike dodajo stroške prenosa (omrežnino), ki se tudi vgrajuje v proizvodno ceno zelenega vodika. Da bi delno kompenzirali visoke stroške električne energije in stroške prenosa, imajo sistemski operaterji možnost omogočiti vključitev vodikovih sistemov v mehanizme balansiranja elektro energetskega sistema, s čemer se lahko ustvarijo dodatni prihodki, ki pozitivno vplivajo na rentabilnost vodikovih sistemov, kar je podrobneje opisano v poglavju 1.

## HYDROGEN CENTER

Proizvajalci zelenega vodika imajo osrednje mesto v celotni verigi. V prvi vrsti upravljajo proces proizvodnje vodika, hkrati pa morajo biti tehnično in ekonomsko koordinirani z vsemi ostalimi člani verige. Tehnična koordinacija s plinovodom pomeni zagotavljanje zahtevane čistosti vodika in zagotavljanje ustrezne količine, da je mogoče ohraniti predpisano razmerje vodika in zemeljskega plina. Tehnična koordinacija s proizvajalci električne energije se nanaša na količine in cene dobavljene energije in na časovni profil dobave. Koordinacija s operaterji omrežja vključuje podrobnosti v zvezi z vključevanjem v sistemske storitve v elektro energetskega sistema.

Plinovodi oziroma operater plinskega omrežja omogoča dodajanje zelenega vodika v plinovodno omrežje. Pri tem mora ohraniti stabilne razmere v plinovodnem omrežju, preprečiti mora nihanje kalorične vrednosti ( $\text{kWh}/\text{Sm}^3$ ) zmesi zemeljskega plina in vodika, kar doseže z zagotavljanjem konstantnega mešalnega razmerja med vodikom in zemeljskim plinom, npr. 5 %. Nihajoča kalorična vrednost lahko povzroči težave pri končnih porabnikih plina, predvsem pri regulaciji zgorevanja. Iz navedenega izhaja, da je potrebno zagotoviti koordinacijo med proizvajalcem zelenega vodika in operaterjem plinovodnega omrežja.

Podjetja, ki se ukvarjajo s trženjem zemeljskega plina, lahko prevzamejo vlogo trženja in prodaje zelenega vodika, ki je primešan zemeljskemu plinu. Pri trženju lahko do določene mere upoštevajo zmanjšanje obsega stroškov emisijskih kuponov  $\text{CO}_2$  in morebitne subvencije za uporabo zelenega vodika.

Končni uporabniki uporabljajo zemeljski plin v večini primerov kot energent za proizvodnjo toplote (proizvodnja toplote in pare v industrijskih procesih, ogrevanje stavb) ter tudi kot surovino (npr. proizvodnja vodika in od tam dalje vodikovega peroksida). Končni uporabniki morajo ugotoviti, ali njihov tehnološki proces v tehničnem pogledu dopušča nadomestitev dela zemeljskega plina z vodikom in v kolikšni meri so njihovi tehnološki procesi občutljivi na morebitno nihanje kalorične vrednosti plinske zmesi. Končni uporabniki morajo ugotoviti, ali lahko morebitno višjo ceno zmesi vodika in zemeljskega plina v primerjavi z zemeljskim plinom vgradijo v njihove končne proizvode ter storitve in ali je trg pripravljen plačati nekoliko višjo ceno ekološko izdelanih proizvodov in izvedenih storitev. Uporaba zmesi zemeljskega plina in zelenega vodika končnim uporabnikom pomaga zmanjšati stroške kuponov za emisije  $\text{CO}_2$ , saj zeleni vodik in njegova pridelava ne povzročata emisij  $\text{CO}_2$ .

Poleg omenjenega scenarija obstaja še vrsta drugih načinov uporabe vodikovih tehnologij, npr.:

- proizvodnja vodika za mobilnost (mestni avtobusi),
- nadgradnja sončnih elektrarn z vodikovimi tehnologijami za zmanjševanje odvisnosti od vremenskih razmer,
- vodikovi sistemi za balansiranje elektroenergetskega sistema in za nudenje fleksibilnosti,
- lokalni vodikovi sistemi za pomoč pri energetske preskrbi lokalnih skupnosti in posameznih objektov.

V vsakem od naštetih scenarijev se poleg proizvajalca vodika oziroma nosilca vodikovih tehnologij nahajajo še drugi subjekti, ki morajo biti vključeni tehnično in ekonomsko analizo scenarija. Nujna je torej povezava med podjetji iz različnih sektorjev in države. Brez navedene koordinacije ni mogoče pričakovati uspešnega uvajanja vodikovih tehnologij.

## 14 Veriga vrednosti proizvodnje opreme in storitev

Ob masovnem prodoru vodikovih tehnologij bo dobava tehnološke opreme (elektrolizerji, gorivne celice, hranilniki, periferne komponente) predstavljala ozko grlo, ker bo povpraševanje nekajkratno presehalo ponudbo. Torej se že danes pojavlja prostor za nove proizvajalce komponent in ponudnike storitev. Trenutna proizvodnja komponent je še nízko avtomatizirana in poteka predvsem v okviru SME podjetij, zato je še možen zagon novih podjetij. Mnoge tehnologije, rešitve in komponente s področja vodikovih tehnologij so zaščitene s patenti. To lahko predstavlja oviro, kar je možno reševati z nakupom patentov, s plačevanjem pravic do uporabe patentov ali z načrtovanjem novih alternativnih izvedb komponent. Druga priložnost se kaže v zasnovi in postavitvi proizvodnih linij za proizvodnjo komponent vodikovih tehnologij, torej avtomatiziranih postrojenj s popolno končno kontrolo kvalitete izdelkov. Avstrija in Slovenija lahko torej sodelujeta pri storitvah in pri proizvodnji komponent:

### Storitve

- Možnostne študije uvajanja vodikovih tehnologij (fakultete, inštituti)
- Tržno ekonomske analize uvajanja vodikovih tehnologij v industriji in elektrogospodarstvu (fakultete, inštituti, določena podjetja)
- Inženiring sistemov iz tržno dostopnih osnovnih sklopov vodikovih tehnologij (skladi za gorivne celice in elektrolizerje), ki rezultirajo v različnih sistemih, kot so sistemi za pretvorbo energije, generatorji električne energije in toplote z uporabo gorivnih celic, shranjevalniki energije, pomožni viri energije na osnovi gorivnih celic, kogeneracijski sistemi z gorivnimi celicami.
- Načrtovanje in postavitve avtomatiziranih tehnoloških linij za proizvodnjo komponent vodikovih tehnologij.

### Fizične komponente

- Periferne komponente, kot so puhala, črpalke,
- DC pretvorniki,
- Moduli avtomatizacije,
- Katalizatorji, membrane,
- Kompletni moduli gorivnih celic in elektrolizerjev,
- Solarni paneli.

### Programske komponente (software)

- Algoritmi za avtomatko vodenje,
- Algoritmi za balansiranje elektro energetskega sistema preko sistemskih storitev in avtomatiziranega trgovanja na borzi električne energije,
- Algoritmi za oceno stanja, napovedovanje iztrošenosti in oceno preostale življenjske dobe vodikovih sistemov.

## 15 Možnosti nadgradnje projekta H2GreenTech

Glede na rezultate in analize v pričujočem dokumentu ocenjujemo, da ima konzorcij udeležencev v regijskem Hydrogen Centru v okviru projekta H2GreenTech ustrezne zmogljivosti in kompetence za učinkovito delo na področjih na področju zelenega vodika in vodikovih tehnologij na področju raziskav in razvoja vodikovih tehnologij, njihovega prenosa v industrijo, kot tudi za proizvodnjo, shranjevanje in uporabo zelenega vodika.

Iz navedenih podatkov in analiz je razvidno, da v čezmejni regiji Slovenija – Avstrija obstaja velik potencial regijskega sodelovanja. Regionalna mreža Hydrogen center je vključni povezovalac in motivator, ki s svojimi obstoječimi in v prihodnje dodatnimi člani išče skupne rešitve, ki prispevajo k izboljšanju regionalnega ekosistema.

Razvojna strategija čezmejne mreže Hydrogen center izpostavlja inovacijski potencial čezmejne regije Slovenija—Avstrija tako v raziskovalnem, razvojnem in socialnem vidiku. Na tak način je omogočen široki pristop k inovacijam v regiji na področju zelenega vodika in vodikovih tehnologij ter vključuje:

- spodbujanje tehnoloških in netehnoloških inovacij,
- krepitev inovacijskih kompetenc MSP-jev in drugih podjetij,
- vzpostavitev regionalnih verig vrednosti.

Za trajnostno in uspešno delovanje regionalnega Hydrogen centra je pomembno:

- uresničevanju razvojne strategije centra
- implementacija Načrta za vodikove tehnologije v Sloveniji in Avstriji ter
- marketinške strategije [17].

Pri tem je poudarek na trajnostnem sodelovanju vseh partnerjev projekta H2GreenTECH in vseh članov Hydrogen centra do leta 2025 in nadalje.

Zato je ena od pomembnih razvojnih in marketinško - promocijskih aktivnosti Hydrogen centra do leta 2025 in nadalje mreženje in povezovanje regionalnih inovacijskih organizacij in akterjev ter spodbujati projektno sodelovanje.

Regionalno sodelovanje članov Hydrogen centra bo prispevalo k oblikovanju močnejšega regionalnega inovacijskega ekosistema na področju zelenega vodika in vodikovih tehnologij.

Sočasno pomeni tudi podporo inovativnemu podjetništvu za ustvarjanje novih inovativnih dosežkov in večjo konkurenčnost gospodarstva in industrijsko diverzifikacijo na področju vodikovih tehnologij. S tem bomo prispevali k rasti inovacijskega potenciala.

Pomembno je zavedanje, da sta učinkovita regionalna strategija Hydrogen center in odporen inovacijski ekosistem ključnega pomena za regijo Interreg SI-AT pri procesu zelenega prehoda.

Hkrati je smiselna in potrebna nadgradnja opravljenih aktivnosti v projektu H2GreenTech predvsem na področjih:

- Ozaveščanje strokovne in laične javnosti o pomenu uvajanja vodikovih tehnologij za uspešen prehod v nizkoogljično družbo (konference, seminarji, spletne predstavitve, itd.)

#### HYDROGEN CENTER

- Čezmejno izobraževanje v dodiplomskem in podiplomskem študiju (izmenjava predavateljev in študentov na izobraževalnih programih razvoja in uporabe vodikovih tehnologij, zasnova enotnega izobraževalnega programa s področja vodikov tehnologij)
- Formiranje konzorcijev za pripravo vsebin prijav na relevantne mednarodne R&I projekte (Horizon Europe, Interreg, Innovation Fund, Eurostars, bilateralna AT-SLO)
- Pregled in ocena izvedenih demonstracijskih projektov uporabe vodikovih tehnologij v obeh regijah
- Izdelava predlogov za nove skupne demonstracijske projekte uporabe vodikovih tehnologij (ocena možnosti za izvedbo skupne H2 Valley po vzoru sodelovanja Slovenije, Italije in Hrvaške, shranjevanje energije na področju hidroelektrarn na reki Dravi, vodikov mestni in pristni transport)
- Ocena možnosti za zagon skupnih podjetij (joint venture) na področju storitev in proizvodnje opreme za vodikove tehnologije
- Vzpostavitev sodelovanja z vladnimi in nevladnimi organizacijami, ki delujejo na področjih uvajanja vodikovih tehnologij in prehoda v nizko-ogljico družbo.

## 16 Reference

- [1] P. Kumer, et al., Roadmap for hydrogen technologies in slovenia and austria. Ministry of education, science and sport of Republic Slovenia, 2022.
- [2] Republika Slovenija: NEPN – Načrt za energetiko in podnebje, 35400-18/2019/22, Ljubljana, 2020. [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/si\\_final\\_necp\\_main\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/si_final_necp_main_en.pdf)
- [3] Federal Ministry, Republic of Austria, Sustainability and Tourism, Integrated National Energy and Climate Plan for Austria. [https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-03/at\\_final\\_necp\\_main\\_en\\_0.pdf](https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-03/at_final_necp_main_en_0.pdf)
- [4] Fuel Cells and Hydrogen for Green Energy in European Cities and Regions, The Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, 2018.
- [5] IEA, The Future of Hydrogen, [iea.org](http://iea.org), 2019.
- [6] I. Dincer, Green methods for hydrogen production, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 37, no. 2, pp. 1954-1971, 2012.
- [7] U. Gupta and U. Turaga: Hydrogen is back in vogue. <https://adi-analytics.com/2019/11/12/hydrogen-is-back-in-vogue>
- [8] J. Bohinec, J. Tršinar, Ž. Žerjav, L. Blažej, T. Štokelj in D. Paravan: Sustainable Transition of the Slovenian Power System until 2050, Elektrotehniški vestnik, Izv. 89, pp. 7-20, 2022.
- [9] M. Kovač, A. Urbančič, D. Staničič: LIFE ClimatePath2050 (LIFE16 GIC/SI/000043), Deliverable C1.1: Climate Mitigation 2050 Potentials and Mid-term Challenges Part 5B: Photovoltaic Rooftop Potential in Slovenia by 2050, IJS-DP-12619, 2018. [https://www.podnebnapot2050.si/wp-content/uploads/2020/06/Deliverable\\_C\\_1\\_1-Part-5B-Potencial-son%C4%8Dnih-elektrarn-na-strehah-objektov-v-Sloveniji.pdf](https://www.podnebnapot2050.si/wp-content/uploads/2020/06/Deliverable_C_1_1-Part-5B-Potencial-son%C4%8Dnih-elektrarn-na-strehah-objektov-v-Sloveniji.pdf)
- [10] Advanced Fuel Cell and Hydrogen Technologies Slovenia – Austria, Protocol B: Fuel Cell and Hydrogen Technologies Development, Research and Infrastructure in the Interreg Region Slovenia – Austria, Task Leader: Graz University of Technology.
- [11] Republika Slovenija: Resolucija o Dolgoročni podnebni strategiji Slovenije do leta 2050 (ReDPS50), Ministrstvo za okolje in prostor, Ljubljana, julij 2021.
- [12] Agencija za energijo Republike Slovenije, <https://www.agencija.si/web/emonitor/delovanje/zemeljski/omrezne-dejavnosti?gid=131643>
- [13] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort: Wasserstoffstrategie für Österreich, Wien, 2022. <https://www.bmk.gv.at/themen/energie/publikationen/wasserstoffstrategie.html>
- [14] Revision of the TEN-E Regulation, EU guidelines for new energy infrastructure, 2021. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/689343/EPRS\\_BRI\(2021\)689343\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/689343/EPRS_BRI(2021)689343_EN.pdf)
- [15] M. Anderl, K. Geiger, B. Gugele, G. Mössl, S. Haider, C. Heller, T. Köther, T. Krutzler, V. Kuchel, C. Lampert, et al. Report: REP-0738 Umweltbundesamt. Klimaschutzbericht 2020, Wien, 2020.
- [16] A. Wang, J. Jens, D. Mavins, M. Moultak, M. Schimmel, K. van der Leun, D. Peters, M. Buseman, Report: Analysing Future Demand, Supply, and Transport of Hydrogen. European Hydrogen Backbone. Report. June 2021.
- [17] Marketinška strategija Hydrogen center, B2B platforma, One-stop shop, do leta 2025 v čezmejnem območju Interreg Slovenija – Avstrija v okviru projekta H2GreenTECH: Štajerska gospodarska zbornica, 2022.