

SMERNICE ZA RAZVOJ LOKALNIH ZELENIH VODIKOVIH EKOSISTEMOV V ALPAH

Razvoj lokalnih zelenih vodikovih ekosistemov v Alpah



Interreg



Co-funded by
the European Union

Alpine Space

AMETHyST



KAZALO VSEBINE

1 UVOD

2 OCENA ALPSKIH ZELENIH VODIKOVIH EKOSISTEMOV

Identifikacija referenčne alpske regije

Potencial obnovljivih virov energije

Identifikacija potencialnega povpraševanja oziroma rabe

Kako povezati proizvodnjo in povpraševanje?

Potencialni okoljski in družbeni vpliv

Razumevanje procesnega toka

3. NAČRTOVANJE ZELENIH VODIKOVIH EKOSISTEMOV V ALPAH

Povezovanje povpraševanja s proizvodnjo

Izbor najprimernejših tehnologij

Oskrba z električno energijo

Proizvodnja vodika

Shranjevanje vodika

Transport

Distribucija vodika

Različne končne uporabe

4. TEHNIČNO-EKONOMSKA OCENA

5. VIRI

3

5

8

8

11

12

13

14

15

16

17

18

20

24

27

29

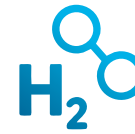
31

33

35



1 UVOD



Prehod na uporabo zelenega vodika (H₂) predstavlja ključno priložnost za trajnostni razvoj energetike na območju Alp. Pri tem je potrebno upoštevati več pomembnih dejavnikov. Čeprav je vodik pogosto predstavljen kot temelj trajnostnega energetskega prehoda, je njegova proizvodnja iz obnovljivih virov še vedno povezana z visokimi stroški in tehnološkimi izzivi. Brez skrbnega načrtovanja lahko vodikovi projekti postanejo neučinkovite naložbe namesto dejanskih rešitev za razogljčenje.



Vodik se lahko proizvaja na več načinov. Trenutno se na svetovni ravni letno proizvede približno 230 milijonov ton vodika, pri čemer ga več kot 95 % izhaja iz parne reformacije metana (SMR – Steam Methane Reforming), torej procesa, ki uporablja metan kot surovino in energetski vir. Ta proces povzroči emisije med 7,5 in 12 kg CO₂ na vsak proizveden kilogram vodika [1, 2, 3]. Leta 2023 je pri tem postopku nastalo 920 milijonov ton emisij CO₂ [4]. Takšen vodik se večinoma uporablja za proizvodnjo gnojil.

Cilj oziroma področje delovanja projekta AMETHyST, ki poteka v okviru programa INTERREG, so Alpske doline, kjer lahko ima vodik strateško vlogo zgolj tam, kjer elektrifikacija ni izvedljiva. To pomeni, da bi morali vodik uporabljati zlasti v sektorjih ali območjih, kjer neposredna elektrifikacija ni mogoča – prav tja bi bilo treba usmeriti naložbe. Za vse ostale namene ostaja elektrifikacija prednostna izbira, saj je energetsko učinkovitejša in ekonomsko bolj vzdržna.

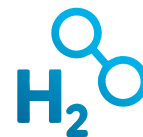
Poleg tega je treba upoštevati nizko skupno učinkovitost vodika – od proizvodnje do končne uporabe. Izgube pri pretvorbi energije na posameznih stopnjah povzročajo, da je skupna učinkovitost pogosto nižja od 30 %, pri čemer je za vzdrževanje te ravni potrebna visoka stopnja optimizacije sistemov. Na poti proti čistejšemu energetskemu sistemu je nujno, da se izognemo oblikovanju še manj učinkovitega okolja. Ključnega pomena so premišljeno načrtovanje, tehnološka pripravljenost in jasna strateška vizija, da se vodik integrira tam, kjer ima resnično smisel, hkrati pa se preprečijo nepotrebne energetske in finančne izgube.

Ta dokument predstavlja metodologijo po korakih, ki služi kot vodilo za načrtovanje, testiranje in vrednotenje uporabe zelenega vodika v alpskem prostoru.

Proces se začne z analizo lokalnega ekosistema in vključuje oceno razpoložljivosti obnovljivih virov energije, potencialnega povpraševanja po vodiku in zmogljivosti proizvodnje. Sledi analiza procesa proizvodnje in rabe, razdelitev na ključne faze in ocena okoljskih ter družbenih učinkov uporabe vodika.

V fazi načrtovanja se metodologija osredotoča na usklajevanje proizvodnje s povpraševanjem, izbor najprimernejših tehnologij in izvedbo tehnično-ekonomske analize izvedljivosti za zagotovitev dolgoročne vzdržnosti modela.

Smernice temeljijo na preverjanjih in pilotnih analizah in rešitvah, izvedenih v okviru projekta, in nudijo osnovo za uporabo rešitev zelene vodikove tehnologije po različnih regijah v Alpah. Metodologija je še posebej uporabna za javne institucije in razvijalce vodikovih projektov, saj omogoča strateško načrtovanje in sprejemanje utemeljenih odločitev.



2 OCENA ALPSKIH ZELENIH VODIKOVIH EKOSISTEMOV



V prvi fazi načrtovanja se identificirajo ključne značilnosti območja, kjer bi lahko razvili vodikov ekosistem, z namenom ugotovitve dejanske izvedljivosti projekta in zagotovitve racionalne rabe virov. Ta korak je ključen za preprečevanje neučinkovitih naložb in za zagotovitev, da se vodik uporablja zgolj tam, kjer predstavlja najbolj učinkovito rešitev v primerjavi z neposredno elektrifikacijo.



Za uspešen energetski prehod je bistveno, da se izkoristi specifični potencial posameznega območja in se oceni, ali je zeleni vodik najbolj primerna rešitev, ki dolgoročno izkazuje ekonomsko in okoljsko vzdržnost in trajnost.

Analiza potenciala je strukturirana na več ravneh:

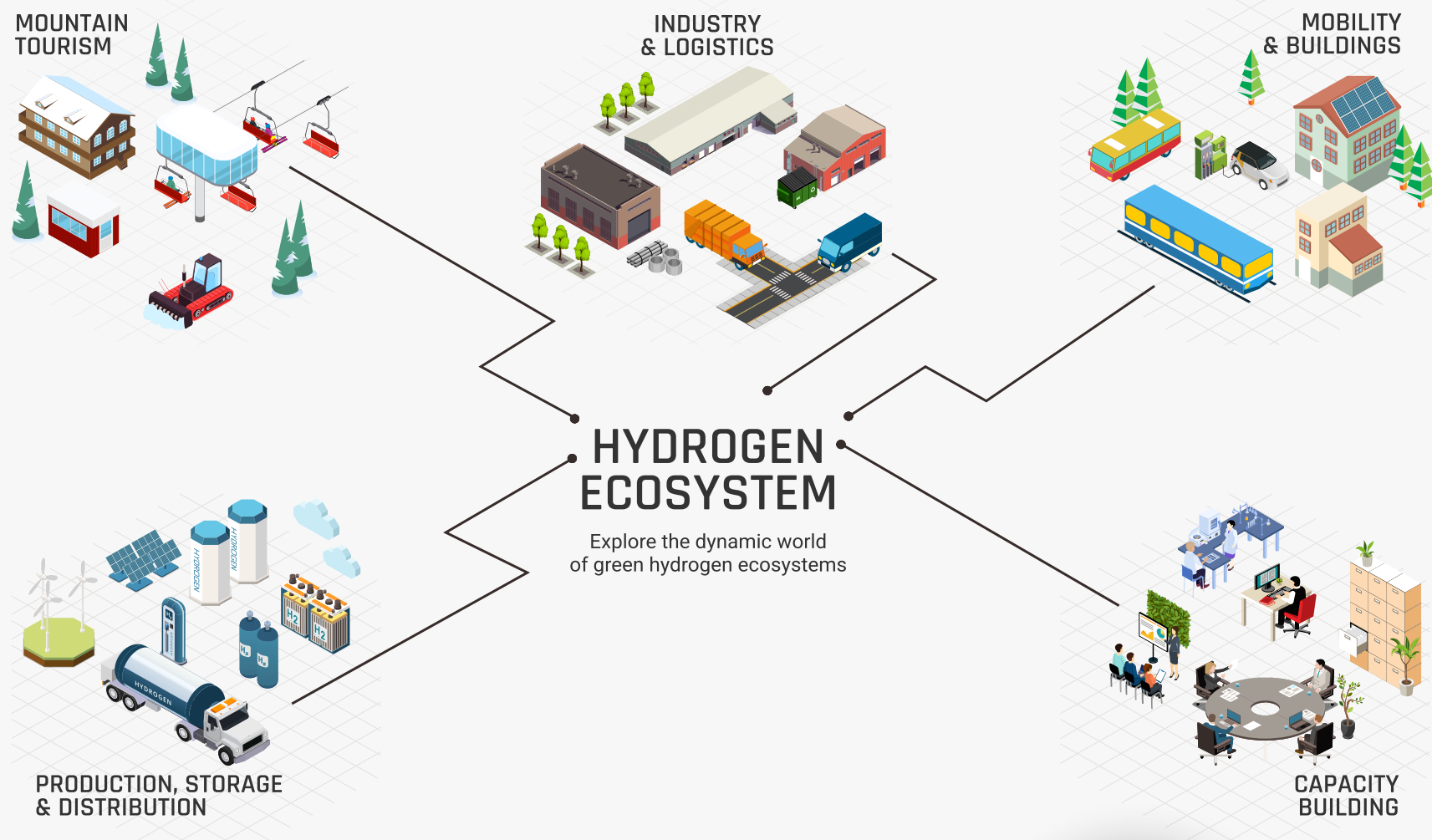
- **identifikacija referenčne alpske regije**
- **analiza obstoječih in razpoložljivih obnovljivih virov energije:** ocenjuje se razpoložljivost in potencial lokalne proizvodnje energije iz obnovljivih virov (sončna energija, veter, hidroenergija, biomasa ...), da se zagotovi, da je proizvodnja vodika resnično zelena in trajnostna;
- **ocena lokalnega povpraševanja po vodiku:** identificirajo se sektorji in procesi, kjer bi se vodik lahko porabljal – na primer v prometu, industrijskih procesih, ki jih je težko elektrificirati, ali v izoliranih območjih, kjer elektrifikacija ni izvedljiva;
- **ocena strukture in možnosti energetskega omrežja:** analizira se lokalno električno omrežje, da se ugotovi, ali je razpoložljiva energija iz obnovljivih virov uporabna neposredno ali je potrebno shranjevanje v obliki vodika, zlasti za obvladovanje presežkov ali specifičnih potreb;
- **analiza proizvodnega potenciala vodika:** oceni se količina vodika, ki bi se lahko lokalno proizvedla glede na razpoložljivost energije in obstoječo ali načrtovano infrastrukturo;
- **ocena okoljskega in družbenega vpliva:** poleg tehničnih vidikov je bistveno oceniti tudi ekološke in družbene posledice razvoja vodikovega ekosistema, da se zagotovi njegova dejanska trajnost in sprejetost s strani lokalnega prebivalstva.



Ta začetna faza omogoča presojo ali je vodik primerna in učinkovita rešitev za izbrano območje ali pa bi bile primernejše druge strategije za razogljčenje. Temeljita predhodna ocena omogoča razvoj ciljno usmerjenih projektov z oprijemljivim in trajnostnim učinkom.



Spodnja slika prikazuje ključne značilnosti vodikovega ekosistema. Interaktivna infografika je na voljo na povezavi: <https://skhyline.eu/>.



Vir: <https://skhyline.eu/>





IDENTIFIKACIJA REFERENČNE ALPSKE REGIJE

Prvi korak je določitev referenčne regije v smislu obravnavanega teritorija, ki naj po potrebi presega administrativne ali geografske meje. Način določanja območja se lahko razlikuje glede na kontekst – razmejitev je lahko osnovana na geografskih, administrativnih, demografskih ali drugih kriterijih.

Ne glede na izbrane razloge in parametre razmejitve, bo od tega koraka odvisna določitev ključnih robnih pogojev za načrtovanje projekta, ki mora biti trajnostnost z vidika tehnologije, financiranja in ekonomike ter družbe in okolja.

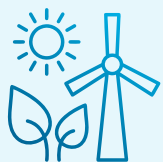
POTENCIAL OBNOVLJIVIH VIROV ENERGIJE

Evropska komisija je sprejela strategijo, ki določa pogoje, pod katerimi se lahko vodik, vodikovi derivati in drugi nosilci energije obravnavajo kot obnovljiva goriva nebiološkega izvora (*Renewable Fuels of Non-Biological Origin* – RFNBO). Ti akti pojasnjujejo uporabo načela »dodatnosti« in so v veljavi od julija 2023.

Načelo »dodatnosti« za obnovljivi vodik je določeno v delegiranih aktih EU in predvideva postopno izvajanje. Za projekte, začete pred 1. januarjem 2028, velja prehodno obdobje, v katerem bodo zahteve glede »dodatnosti« uporabljene bolj prilagodljivo. V tem času bodo proizvajalci lahko usklajevali proizvodnjo vodika z obnovljivimi viri na mesečni ravni. Popolna implementacija bo veljala od 1. januarja 2030 dalje, ko bo zahtevan strožji časovni nadzor (verjetno na urni ali dnevni ravni). Države članice lahko uvedejo strožja pravila že s 1. julijem 2027.



Načelo »dodatnosti« se uveljavlja prek treh glavnih meril:



VIRI ENERGIJE:

Elektrolizerji morajo uporabljati električno energijo, proizvedeno iz novih obnovljivih virov (ne glede na to, kaj uporabljajo ali so uporabljali ob začetku projekta).

Dovoljene alternative:

- Priklop na elektroenergetski sistem je možen, če ima ≥ 90 % obnovljivih virov v letnem povprečju.
- Emisije morajo biti nižje od 18 g CO₂ekv/MJ (ca. 56 g CO₂/kWh).



ČASOVNA IN PROSTORSKA KORELACIJA:

- Časovna: Obnovljiva energija mora biti proizvedena v istem časovnem obdobju (ura/dan/mesec), v katerem deluje elektrolizer.
- Prostorska: Proizvodnja mora potekati v istem tržnem območju električne energije (t. i. "bidding zone") ali v povezanih območjih na morju.



POGODBENA ORODJA:

- Pogodbe o odkupu električne energije (PPA) z novimi obnovljivimi elektrarnami.
- Neposredna samooskrba z energijo iz obnovljivih virov.

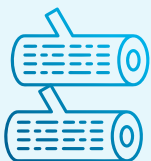
Do leta 2030 je torej dovoljena mesečna korelacija med proizvodnjo vodika in obnovljivimi viri. Za projekte, začete pred letom 2028, je dovoljena uporaba električne energije iz omrežja, če se ta kompenzira z novimi PPA-pogodbami za obnovljive vire v isti državi članici.

Takšen regulativni okvir naj bi zagotovil, da bo naraščajoča ponudba obnovljivega vodika povezana z novimi in ne obstoječimi obnovljivimi viri energije, s čimer se spodbuja povečevanje skupne količine obnovljive energije v EU.

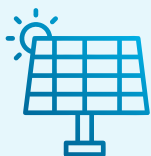
Na tej osnovi je ključno identificirati tiste obnovljive vire, ki so na določenem območju najbolj prisotni oz. dostopni.



Ko so meje sistema znane, se analizira potencial obnovljivih virov na izbranem območju. V nadaljevanju je kratek pregled virov, značilnih za alpski prostor:

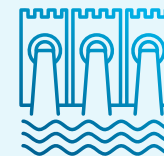


LESNA BIOMASA: Eden najbolj razširjenih virov v alpskem prostoru. Kljub razširjenosti in povečevanju gozdne pokritosti v določenih območjih, je realna ocena razpoložljive biomase ob trajnostnem gospodarjenju zelo zahtevna. Zaradi obstoječe rabe za ogrevanje in nizkih izkoristkov pri proizvodnji elektrike z zgorevanjem, se proizvodnja vodika preko elektrolize na osnovi biomase močno odsvetuje. Trenutno se raziskujejo alternativne tehnologije, kot sta piroliza in uplinjanje (TRL 5–6).



SONČNA ENERGIJA (FV): Čeprav ta vir ni optimalen za alpska območja zaradi manjše osončenosti, nove generacije fotonapetostnih modulov (zlasti obojestranski paneli) omogočajo rešitve, ki do nedavnega niso bile ekonomsko upravičene. Zanimivi so tudi pristopi, ki ne stremijo le k največji letni proizvodnji, temveč k boljši razporeditvi proizvodnje (npr. usmerjenost panelov proti vzhodu in zahodu). Za oceno proizvodnje je uporabna [spletna stran JRC](#).

HIDROENERGIJA: Gre za najpomembnejši vir proizvodnje električne energije v alpskem prostoru, ki pa je že v veliki meri izkoriščen. Smiselno je preveriti presežke obstoječih elektrarn in jih morebiti uporabiti za proizvodnjo vodika namesto za oddajo elektrike v omrežje ali ustavljanje elektrarn. Ekonomsko upravičenost te možnosti je treba skrbno ovrednotiti. Ob načrtovanju novih hidroelektrarn je treba upoštevati okoljske standarde in minimalni pretok vodotokov, še posebej glede na spremembe padavinskega režima zaradi podnebnih sprememb. Akumulacijske elektrarne s črpalnimi sistemi se priporočajo za shranjevanje energije (npr. za uravnavanje vršnih obremenitev) ne pa za proizvodnjo vodika.



VETER: Čeprav manj razširjen v alpskem prostoru, se njegova uporaba za proizvodnjo obnovljivega vodika ne izključuje. Posebej ob povezavi s sončno energijo je lahko koristna, saj sta vira pogosto komplementarna po urah in sezonah. Za oceno potenciala so na voljo evropske in globalne baze podatkov.



IDENTIFIKACIJA POTENCIALNEGA POVPRAŠEVANJA OZIROMA RABE

Naslednji ključen korak je določitev potencialnega povpraševanja oziroma rabe, v okviru katerega preverimo, **kateri so mogoči načini in sistemi uporabe vodika v identificiranem okolju**. Bistveno je, da se povpraševanje opredeli v tistih procesih in storitvah, kjer elektrifikacija **ni izvedljiva**, saj je učinkovitost vodika nižja v primerjavi z neposredno rabo električne energije [5].

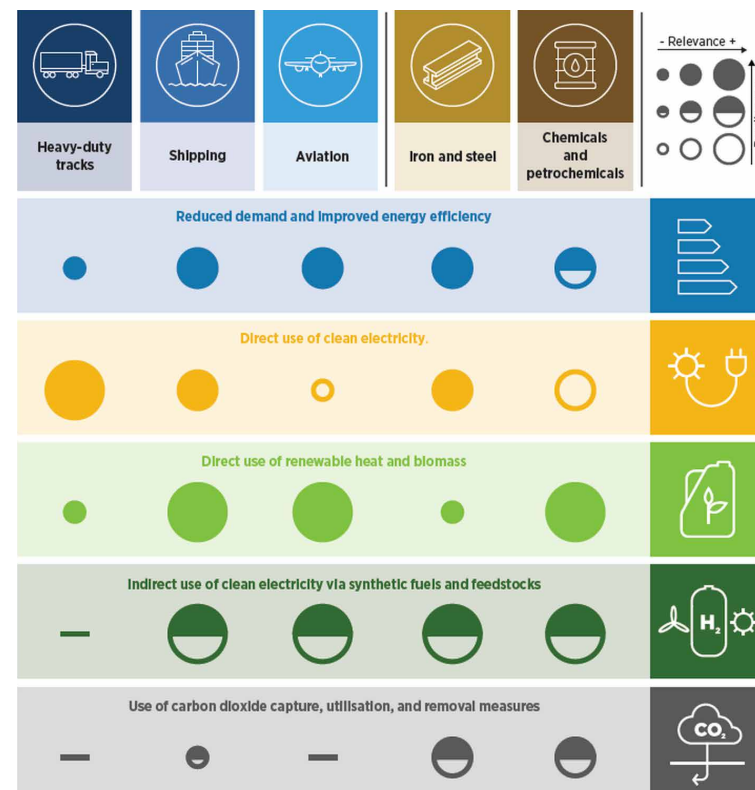
Navajamo nekaj primerov možne uporabe:

- tovorni promet po zahtevnem ali strmem terenu,
- industrijski procesi, ki potrebujejo visokotemperaturno toploto,
- v sektorju zimskega turizma (gondole, vlečnice, teptalniki snega, predvsem na območjih brez elektrike).

Uporaba vodika za **ogrevanje** v individualnih gospodinjstvih je na splošno **odsvetovana** zaradi nizke celotne učinkovitosti verige od proizvodnje do končne rabe. Večstopenjski proces pretvorbe elektrike v vodik in nazaj v toploto povzroča velike energetske izgube, zato so neposredna elektrifikacija ali druge rešitve z obnovljivimi viri energije bistveno učinkovitejše.

Zato je nujno identificirati **sektorje** v regiji, ki jih je **težko razogljčiti ali enostavno elektrificirati** in oceniti morebitno uporabo vodika **v primerjavi z drugimi ogljično nevtralnimi tehnologijami**, še posebej glede na možnost elektrifikacije. Koristno je oceniti potencialno povpraševanje **v količinskem smislu** in kjer je mogoče, tudi v **termodinamičnih pogojih** (predvsem agregatno stanje in delovni tlak naprav). Ti parametri so ključni za pravilno dimenzioniranje proizvodnih postopkov.

Slika (v dokumentu) je povzeta iz poročila IRENA, 2024 [6].



Summary of the key technological pathways and readiness assessment for selected sectors

KAKO POVEZATI PROIZVODNJO IN POVPRASEVANJE?

Oskrbo in povpraševanje je treba **količinsko in kakovostno uskladiti potem**, ko smo opredelili proizvodne količine in potencial rabe vodika.

Najprej se pripravi **količinska ocena**, v okviru katere primerjamo letno (mesečno, dnevno) proizvodnjo in letno (mesečno, dnevno) povpraševanje. Ključni omejevalni dejavnik pri določanju proizvodnje je razpoložljivost električne energije za proizvodnjo vodika. Če je povpraševanje manjše od proizvodnje, je treba izdelati podrobnejšo **ekonomsko analizo** za optimizacijo velikosti obnovljivih virov in zagotovitev finančne vzdržnosti sistema.

Nato je potrebna **kakovostna analiza** zaradi **sezonskih variacij proizvodnje**. Proizvodnja iz sončnih elektrarn je večja poleti, medtem ko je proizvodnja iz vetrnih virov pogosto višja pozimi. Na strani povpraševanja je treba oceniti ali obstajajo sezonski ali drugi vrhunci porabe oziroma ali je povpraševanje konstantno skozi vse leto.

Večje kot je **odstopanje med časom proizvodnje in časom porabe**, večja je potreba po **shranjevanju**, kar neposredno **povečuje stroške** celotnega proizvodnega sistema.



POTENCIALNI OKOLJSKI IN DRUŽBENI VPLIV

Pri razvoju zelenega vodikovega ekosistema in v okviru analize izhodiščnega stanja je treba **celostno oceniti vplive dejavnosti ljudi in okoljske ter družbene izzive**.

DRUŽBENI VIDIK

Vključevanje lokalnih skupnosti je **ključnega pomena za preprečevanje pojava NIMBY** (*»not in my backyard«*), ki je danes vse pogostejši. **Javna sprejemljivost** je bistvena za uspešno izvajanje vodikovih projektov, saj lahko nasprotovanje s strani prebivalcev projekte **zadrži ali celo onemogoči**. **Jasna in pregledna komunikacija** o prednostih vodika (npr. zmanjšanje emisij, boljša kakovost zraka) ter **odgovarjanje na pomisleke** glede varnosti, vplivov na okolje in rabe virov so ključni za pridobitev družbene podpore.

OKOLJSKI VIDIK

Proizvodnja in uporaba vodika morata biti **skrbno načrtovani**, da se čim bolj zmanjša **ekološki odtis**. Čeprav ima vodik potencial za razogljičenje sektorjev, ki jih je težko elektrificirati (npr. tovorni promet, industrijski procesi), mora njegova proizvodnja **temeljiti na obnovljivih virih**, da se prepreči le **premik emisij navzgor po verigi**.

Tudi infrastruktura za **shranjevanje in distribucijo** vodika mora biti **okolju in prostoru prijazna**, zlasti v občutljivih alpskih okoljih. To vključuje omejitev vizualnega vpliva, rabe prostora in posegov v naravo.

Eden izmed **spornih vidikov** je lahko **raba vode** [7]. Pri uporabi vodika na smučiščih bi potrebna količina vode za elektrolizo lahko **povečala skupno porabo vode**, ki je že visoka zaradi umetnega zasneževanja. Ocenjuje se, da je za proizvodnjo enega kilograma vodika potrebnih **30–50 litrov vode** [8], kar lahko **še poslabša problematiko pomanjkanja vode** v gorskih območjih, ki so zaradi podnebnih sprememb in turističnih pritiskov že obremenjena.



RAZUMEVANJE PROCESNEGA TOKA

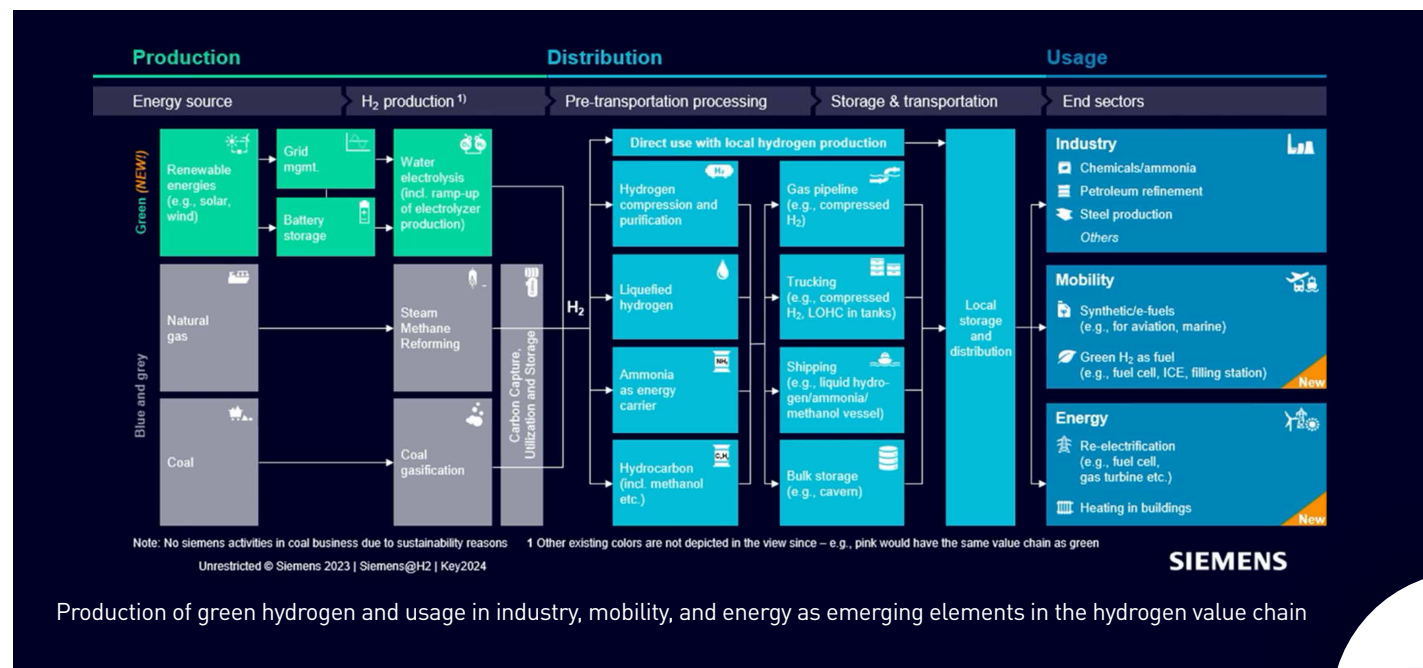
Zadnji korak v tej predhodni fazi je **vizualizacija posameznih faz procesa** v tehničnem smislu: **proizvodnja, shranjevanje, transport in uporaba**. Vsaka od teh faz vključuje specifično infrastrukturo, ki je trenutno še vedno precej draga.

Za **optimizacijo celotnega procesa** je pomembno, da se **povezave med fazami načrtujejo že v začetku načrtovanja**, saj lahko napačno usklajevanje bistveno vpliva na stroške in učinkovitost.

Poleg tega je **ključnega pomena vključevanje vseh relevantnih deležnikov** in spodbujanje **dialoga, izmenjave znanja in posvetovanj**, predvsem glede **proizvodnje in uporabe vodika**. Glavni dejavnik celotnega sistema je namreč **povpraševanje po gorivu**, kajti to določa potrebne količine in ritem celotnega procesa.

Že v začetni fazi je treba **preveriti tudi razpoložljive vire financiranja in spodbud**, ki lahko odločilno vplivajo na izvedljivost in obseg projekta.

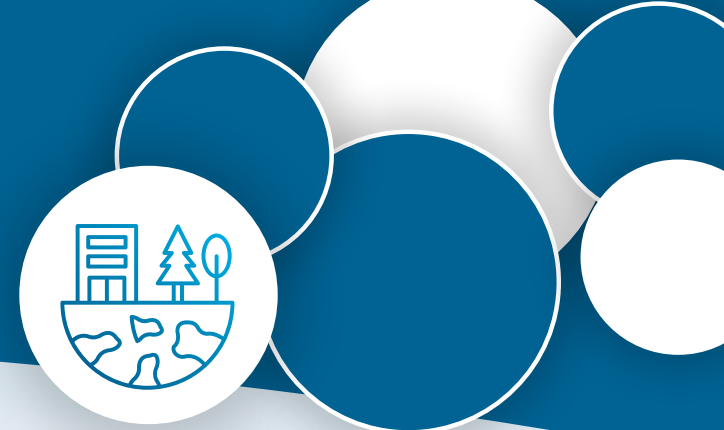
Spodnja slika (v dokumentu) je povzeta iz predstavitve na sejmu Key Energy 2024: “*Zanesljiv tehnološki partner vzdolž verige vrednosti vodika*”, avtorica: Valentina Dondi, Siemens Spa.



Production of green hydrogen and usage in industry, mobility, and energy as emerging elements in the hydrogen value chain



3 NAČRTOVANJE ZELENIH VODIKOVIH EKOSISTEMOV V ALPAH



Pozornost pri načrtovanju je usmerjena v izbor najprimernejših tehnologij za identificirani ekosistem. Čeprav tehnologije na področju vodika hitro napredujejo in se prilagajajo trgu, je dobavna veriga še vedno nezrela. To neposredno vpliva na stroške pripadajočih tehnologij. Ti se lahko zelo razlikujejo glede na izbrano tehnologijo, tudi znotraj iste faze procesa, pogosto pa je težko izdelati zanesljive tehnične ocene zaradi pomanjkanja podatkov v literaturi. Razlog za to je, da številne tehnologije še niso bile testirane v daljšem časovnem obdobju pod trajnim obremenjevanjem.

Pogosto je treba poseči po znanstvenih publikacijah, da se sledi razvoju tehnologij na področju vodika.

Ključno je razumevanje, da ena tehnologija ni nujno enakovredna drugi glede na razmerje med stroški in koristmi in da je zelo težko ohraniti ustrezne trajnostne standarde, če se ekosistem ne obravnava celostno, temveč ločeno po posameznih segmentih. Na primer stiskanje vodika na 500 ali 1000 barov za elektrolizerjem pomeni bistveno razliko v stroških in učinkovitosti celotnega procesa.

POVEZOVANJE POVPRAŠEVANJA S PROIZVODNJO

Prvi korak pri načrtovanju je povezava med proizvodnjo in povpraševanjem.

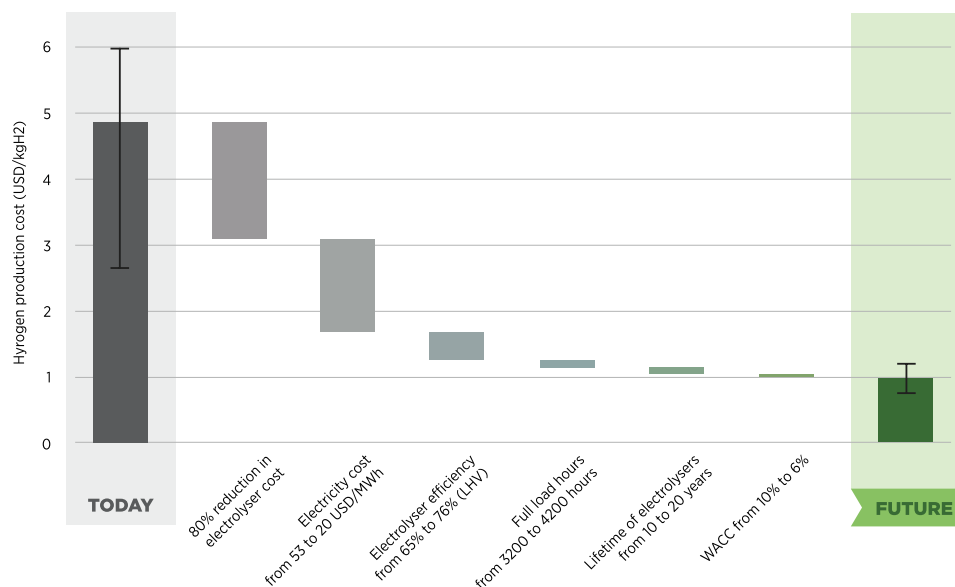
Bolj ko proizvodnja vodika **časovno sovpada** (sezonsko, mesečno, dnevno) s potrebami porabnikov, manjši je **časovni izpad (ustavitev)** delovanja sistema in predvsem manjša je potrebna kapaciteta **shranjevanja**, ki ima sicer lahko velik vpliv na **investicijske stroške (CAPEX)**, če ni pravilno dimenzionirana. Te okoliščine je treba nujno vključiti v načrtovanje in oceno potrebne logistike in transporta.

Časovno ujemanje proizvodnje in porabe mora biti upoštevano že v najzgodnejših fazah načrtovanja proizvodne vodika in energije iz obnovljivih virov. Seveda pa to ne velja za **že obstoječe objekte**, kjer je treba posebej oceniti, ali je naložba v proizvodnjo vodika smiselna v primerjavi z oddajo električne energije v omrežje ali drugimi načini shranjevanja.

Prav tako je treba individualno oceniti možnost vključevanja proizvodnih enot ali porabnikov, ki niso locirani znotraj obravnavanega območja. Jasno je, da **manjša oddaljenost** pomeni nižje stroške transporta – tako energetske kot finančne.

Spodnji graf (v dokumentu) prikazuje kombinacijo znižanih stroškov za elektriko in elektrolizer s povečano učinkovitostjo in življenjsko dobo, ki lahko pomeni tudi 80 % nižje stroške proizvodnje vodika.

A combination of cost reductions in electricity and electrolyzers, combined with increased efficiency and operating lifetime, can deliver 80% reduction in hydrogen cost.



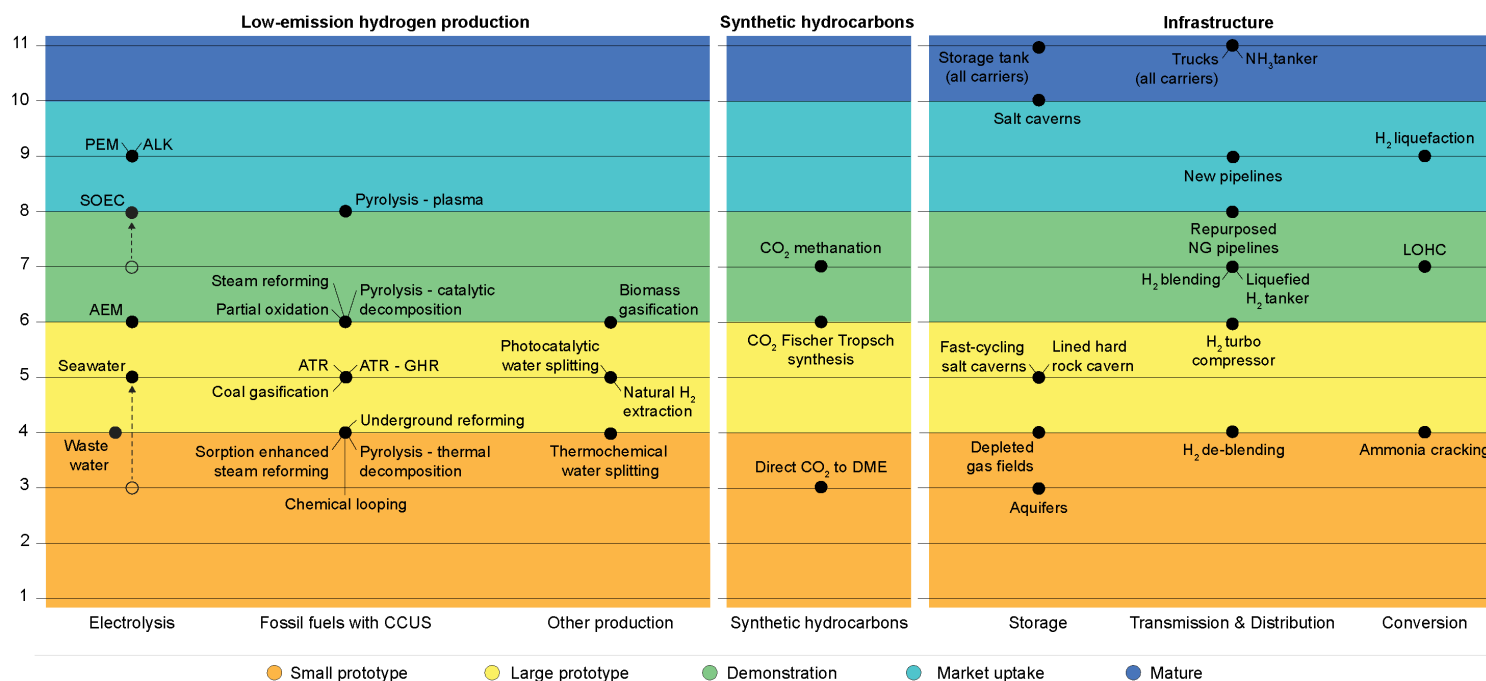
Note: 'Today' captures best and average conditions. 'Average' signifies an investment of USD 770/kilowatt (kW), efficiency of 65% (lower heating value – LHV), an electricity price of USD 53/MWh, full load hours of 3200 (onshore wind), and a weighted average cost of capital (WACC) of 10% (relatively high risk). 'Best' signifies investment of USD 130/kW, efficiency of 76% (LHV), electricity price of USD 20/MWh, full load hours of 4200 (onshore wind), and a WACC of 6% (similar to renewable electricity today).

IZBOR NAJPRIMERNEJŠIH TEHNOLOGIJ

Pri izboru tehnologije je odločitev odvisna od značilnosti načrtovanega sistema. Najprej je nujno spremljati **najnovejše tehnološke dosežke**, nato pa izbrati rešitve, ki so **tehnološko zrele** in **kommercialno dostopne**. Sposobnost ocenjevanja stopnje tehnološke pripravljenosti (TRL) na trgu je enako pomembna kot temeljito načrtovanje.

Tabela spodaj prikazuje stopnje tehnološke pripravljenosti za nekatere tehnologije proizvodnje nizko ogljičnega vodika, sintetičnih goriv in infrastrukture.

Technology readiness levels of production of low-emission hydrogen and synthetic fuels, and infrastructure



IEA. CC BY 4.0.

Notes: AEM = anion exchange membrane; ALK = alkaline; ATR = autothermal reformer; CCUS = carbon capture, utilisation and storage; CH₄ = methane; DME = dimethyl ether; GHR = gas-heated reformer; LOHC = liquid organic hydrogen carrier; NH₃ = ammonia; PEM = proton exchange membrane; SOEC = solid oxide electrolyser cell. Biomass refers to both biomass and waste. Arrows show changes in technology readiness level as a consequence of progress in the past year. For technologies in the CCUS category, the technology readiness level refers to the overall concept of coupling production technologies with CCUS and high CO₂ capture rates. Pipelines refer to onshore transmission pipelines. Storage in depleted gas fields and aquifers refers to pure hydrogen and not to blends. LOHC refers to hydrogenation and dehydrogenation of liquid organic hydrogen carriers. Ammonia cracking refers to low-temperature ammonia cracking. Technology readiness level classification based on [Clean Energy Innovation \(2020\)](#).

Sources: [IEA Clean Tech Guide \(2023\)](#); IEA Hydrogen Technology Collaboration Programme.

OSKRBA Z ELEKTRIČNO ENERGIJO

Načini oskrbe z električno energijo so lahko različni:

SAMOSTOJEN SISTEM (T. I. OTOČNI SISTEM):

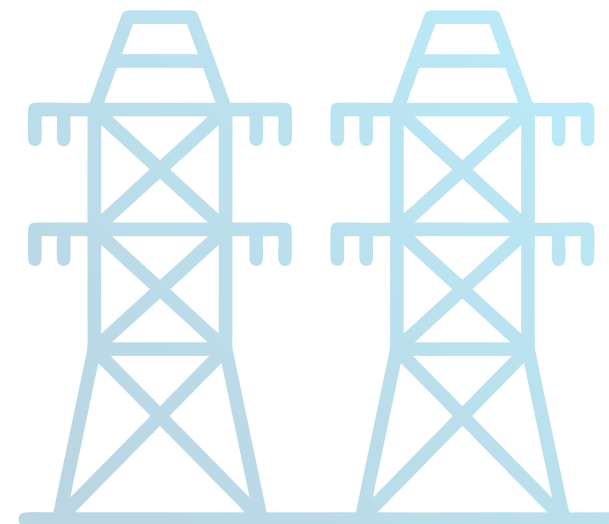
Cilj je **maksimalna samooskrba**. Priporočena je uporaba baterij za dnevno shranjevanje električne energije. Običajno se optimizacija doseže z iskanjem presečišča med krivuljama samooskrbe in faktorja izkoriščenosti (*Capacity Factor* – CF). Pri samooskrbi krivulja narašča z večanjem elektrolizerja, CF pa s tem pada. CF je definirana kot:

Porabljena energija za proizvodnjo vodika / (moč elektrolizerja × 8760 ur)

OBNOVLJIVI VIR IN PRIKLOP NA OMREŽJE (PPA POGODBA):

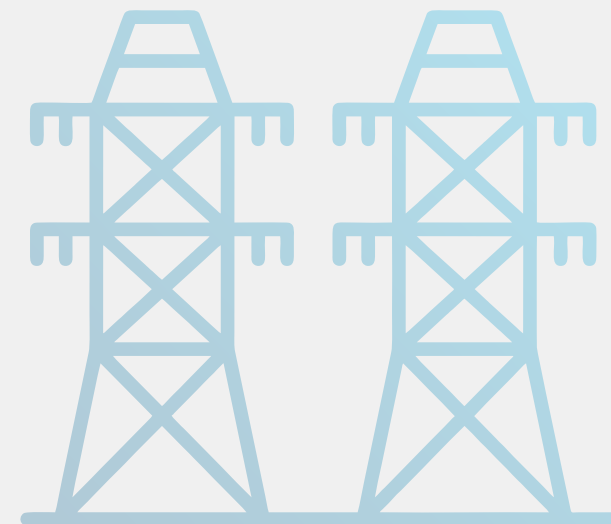
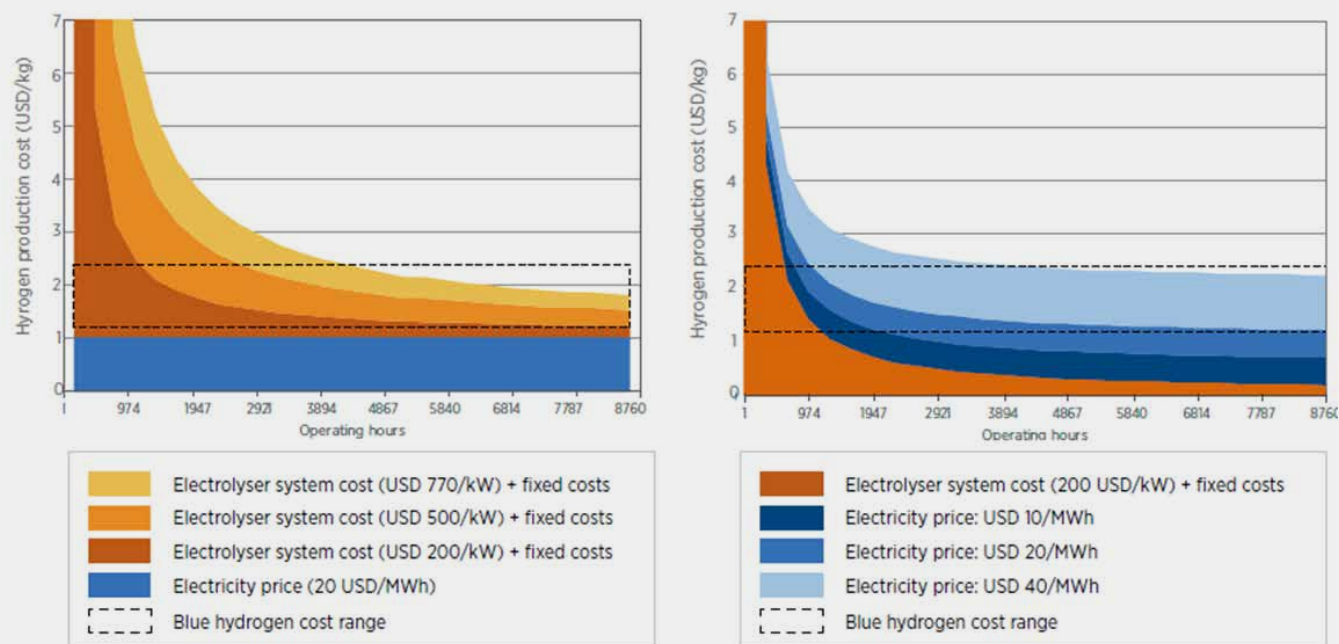
V tem primeru je treba oceniti **spremenljive dnevne stroške elektrike**. Če je cilj maksimirati finančne kazalnike, je treba določiti, **kdaj je proizvodnja vodika bolj donosna** kot prodaja elektrike v omrežje. Če je cilj maksimirati količino proizvedenega vodika, se uporabi vsa proizvedena energija, pri tem pa se preveri ali je ceneje kupovati elektriko iz omrežja (ki pa ni nujno iz obnovljivih virov energije, lahko pa se pridobi potrdilo o izvoru) ali jo proizvajati. Možno je tudi vključiti **shranjevanje**.

SAMO PRIKLOP NA OMREŽJE (PPA): Tukaj prevladuje **finančna ocena stroškov**, vendar je ta model **močno odsvetovan** – zaradi odvisnosti od omrežja in že omenjenega **načela dodatnosti**, ki bo v prihodnosti še bolj strogo regulirano.



Graf (v dokumentu) prikazuje vpliv **faktorja izkoriščenosti oziroma časa delovanja v povezavi z investicijskimi stroški in ceno električne energije na stroške proizvodnje vodika**

Hydrogen production cost as a function of investment, electricity price and operating hours.



Note: Efficiency at nominal capacity is 65% (with an LHV of 51.2 kWh/kg H_2), the discount rate 8% and the stack lifetime 80 000 hours.

Based on IRENA analysis.

PROIZVODNJA VODIKA

Elektroliza vode ostaja **najbolj razvita in obetavna tehnologija** za proizvodnjo vodika iz brezogljčnih virov. Temelji na uporabi elektrolizerjev. To so naprave, ki z električno energijo razcepijo molekulo vode na atome vodika in kisika.

Obstaja več vrst elektrolizerjev:

- **AWE** (alkalni elektrolizerji),
- **PEM** (elektrolizerji s protonsko izmenjevalno membrano),
- **AEM** (z anionsko izmenjevalno membrano),
- **SOEC** (trdnooksidne elektrolizne celice).

Za prve tri, tehnološko bolj zrele, znaša energijska potreba za proizvodnjo 1 kg vodika **med 50 in 65 kWh** električne energije. Glede na kurilno vrednost vodika (**33,3 kWh/kg**) pomeni to **učinkovitost elektrolize po prvem zakonu termodinamike** okoli **55–70 %**.

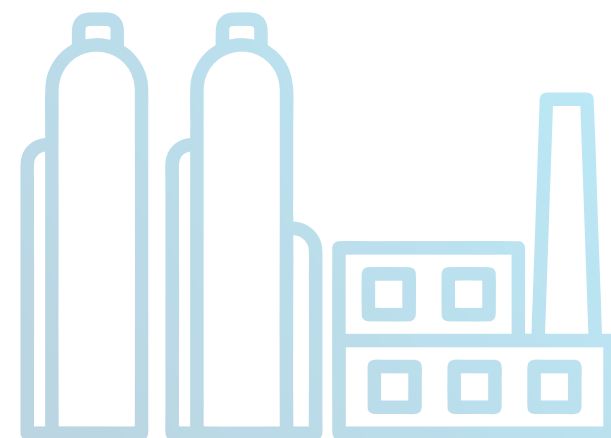
SOEC se razlikujejo od ostalih elektrolizerjev po tem, da delujejo pri **visokih temperaturah (600 – 900 °C)** in omogočajo razcep **vodne pare** na vodik in kisik s pomočjo **keramične membrane iz trdnega oksida**.

Tehnologije za proizvodnjo vodika so še vedno **zelo drage**. Postavitev proizvodnega obrata pomeni **visoke začetne investicije (CAPEX)** in **nezanemarljive obratovalne stroške (OPEX)**. Samo komponenta električne energije je zelo obremenjujoča: pri ceni **0,15 EUR/kWh** znaša strošek **za proizvodnjo 1 kg vodika več kot 8 EUR**.

Zato trenutni strošek proizvodnje **zelenega vodika** močno presega **2–3 EUR/kg**, kar velja za vodik iz fosilnih virov (v optimalnih pogojih). To močno vpliva na tržno konkurenčnost in pomeni, da so **spodbude ključne**, da bo vodik vsaj minimalno konkurenčen.

Za izboljšanje privlačnosti naložb igra pomembno vlogo **faktor izkoriščenosti**:

- Pri uravnavanju omrežja ta faktor **redko preseže 20 %**, kar resno ogroža ekonomsko vzdržnost.
- Če je elektrolizer povezan s sončno elektrarno brez hranilnika, znaša obratovalni čas približno **2.000 ur/leto**, kar pomeni, da **kapitalski stroški postanejo ključen izziv** [9].



Različne tehnologije elektrolizerjev se različno odzivajo na **spremenbe jakosti in frekvence električne energije**. V splošnem se pri vseh tehnologijah pojavljajo **pogosti vklopni in izklopni cikli**, kar vpliva na **učinkovitost in življenjsko dobo naprave**.

Težko je oceniti, kako pogosto zaustavljanje vpliva na dolgoročno učinkovitost, saj

- podatki o celotnem življenjskem ciklu tehnologij **še niso zbrani** in
- gre za **sorazmerno nove tehnologije**.

Po tehnološki zrelosti jih lahko razvrstimo sledeče: **AWE, PEM, AEM, SOEC** [10].

Tudi **časi zaustavitve** elektrolizerjev se razlikujejo in so za

- **PEM** nekaj minut,
- **alkalni (AWE)** desetine minut,
- **SOEC** do **ene ure** [9, 11].

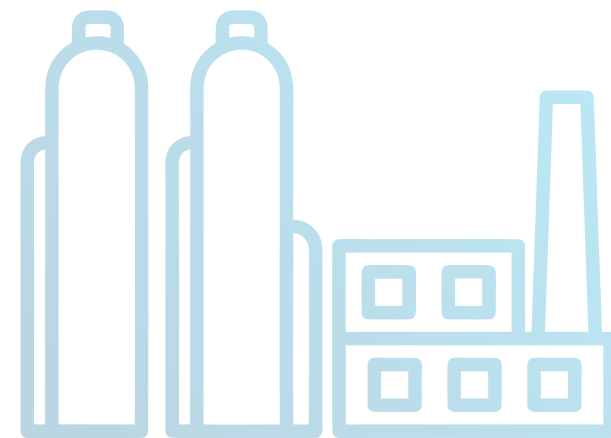
To pomeni, da je **SOEC najmanj primerna tehnologija** za uporabo v razmerah s spremenljivo proizvodnjo ali prekinitvami, kar je značilno za sisteme, ki upravljajo presežke iz obnovljivih virov.

Tudi pri **spremembah frekvence in vhodne energije** velja, da so **PEM elektrolizerji najprimernejši**, saj so sposobni hitrega odziva (Fast Frequency Response). Vendar je kakovost elektrolizerja odvisna od **proizvodnih pogojev (tlak, temperatura)** in **kakovosti elektrod ter sklopov**.

Uporaba **baterijskega hranilnika poveča stroške sistema** [11, 12, 13], vendar lahko

- zmanjša število vklopov/izklopov,
- podaljša življenjsko dobo naprave in
- poveča faktor izkoriščenosti v kombinaciji z nestanovitnimi viri (npr. sončna ali vetrna energija).

Še vedno primanjkuje **podatkov o degradaciji** naprav v nestacionarnih pogojih, torej glede na **tehnologijo** in **uporabne pogoje**.



Preverjanje čistosti vodika, ki prihaja iz elektrolizerja, je **ključnega pomena za vsako končno uporabo**:

- **Gorivne celice** zahtevajo **izjemno visoko čistost** ($\geq 99,999\%$ ali razred 5.0), saj lahko že sledovi nečistoč **zastrupljajo katalizatorje** in močno zmanjšajo učinkovitost in življenjsko dobo.
- **Neposredno zgorevanje** zahteva nekoliko nižjo čistost (približno $99,9\%$ ali razred 3.0), vendar nečistoče lahko **spremenijo obnašanje plamena** in emisije.
- **Shranjevanje v kovinskih hidridih** zahteva srednjo do visoko čistost ($\geq 99,99\%$ ali razred 4.0), saj nečistoče lahko **degradirajo materiale** in zmanjšajo učinkovitost shranjevanja.

Različne vrste elektrolizerjev proizvajajo vodik z različno čistostjo:

- **alkalni**: $99\text{--}99,9\%$, pogosto zahtevano **dodatno čiščenje**,
- **PEM**: $\geq 99,999\%$, zelo visoka čistost že na izhodu – **idealen za gorivne celice**,
- **AEM**: $99,9\text{--}99,99\%$, skuša združiti nizke stroške alkalnih sistemov s čistostjo PEM,
- **SOEC**: zaradi visoke temperature lahko doseže **zelo visoko čistost ($\geq 99,999\%$)**, a je bolj primerna za **industrijske aplikacije**.

Izbira pravega elektrolizerja je torej **tesno povezana z zahtevano čistostjo vodika** glede na **končno uporabo**.

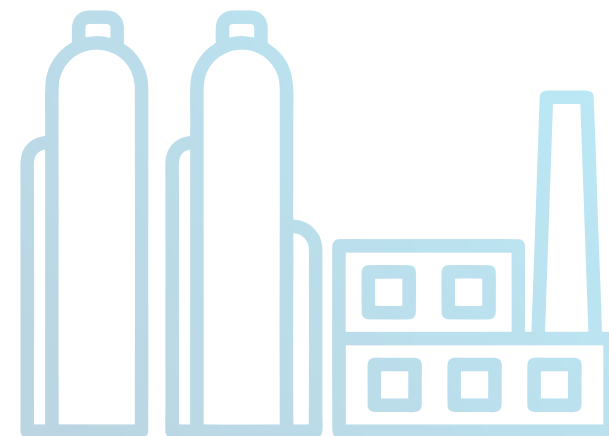


Tabela spodaj prikazuje oceno optimalnih parametrov glede na potencial. Povzeta je iz poročila IEA in se nanaša na različne tehnologije, ki so trenutno na voljo na trgu [9].

Parameter	Alkalni (AWE)	PEM	AEM	SOEC
Gostota toka [A/cm^2]	0,2 – 0,8	1 – 2	0,2 – 2	0,3 – 1
Napetostno območje (V)	1,4 – 3	1,4 – 2,5	1,4 – 2,0	1,0 – 1,5
Temperatura delovanja [$^{\circ}\text{C}$]	70 – 90	50 – 80	40 – 60	700 – 850
Tlak v celici (bar)	< 30	< 30	< 35	1
Delovni razpon (obremenitev)	15 % – 100 %	5 % – 120 %	5 % – 100 %	30 % – 125 %
Čistost H_2 (%)	99,9 – 99,9998	99,9 – 99,9999	99,9 – 99,999	99,9
Napetostna učinkovitost (LHV)	50 % – 68 %	50 % – 68 %	52 % – 67 %	75 % – 85 %
Električna učinkovitost (sklop)	47 – 66 kWh/kg H_2	47 – 66 kWh/kg H_2	51,5 – 66 kWh/kg H_2	35 – 50 kWh/kg H_2
Učinkovitost (sistem)	50 – 78 kWh/kg H_2	50 – 83 kWh/kg H_2	57 – 69 kWh/kg H_2	40 – 50 kWh/kg H_2
Življenjska doba sklopa (ur)	60.000	50.000 – 80.000	> 5.000	< 20.000
Velikost enote (sklop)	1 MW	1 MW	2,5 kW	5 kW
Površina elektrode (cm^2)	10.000 – 30.000	1.500	< 300	200
Čas hladnega zagona	< 50 min	< 20 min	< 20 min	> 600 min

SHRANJEVANJE VODIKA

Vodik, ki nastane v fazi proizvodnje, je v **plinastem stanju** in pod tlakom, ki ustreza delovanju elektrolizerja in z upoštevanjem izgub. Po fazi proizvodnje želimo doseči **tlak za shranjevanje, ki je** običajno okoli **200 barov, zato vodik vodimo skozi kompresor**, ki ga stisne do želenih tlačnih pogojev.

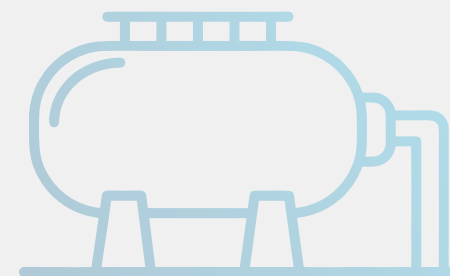
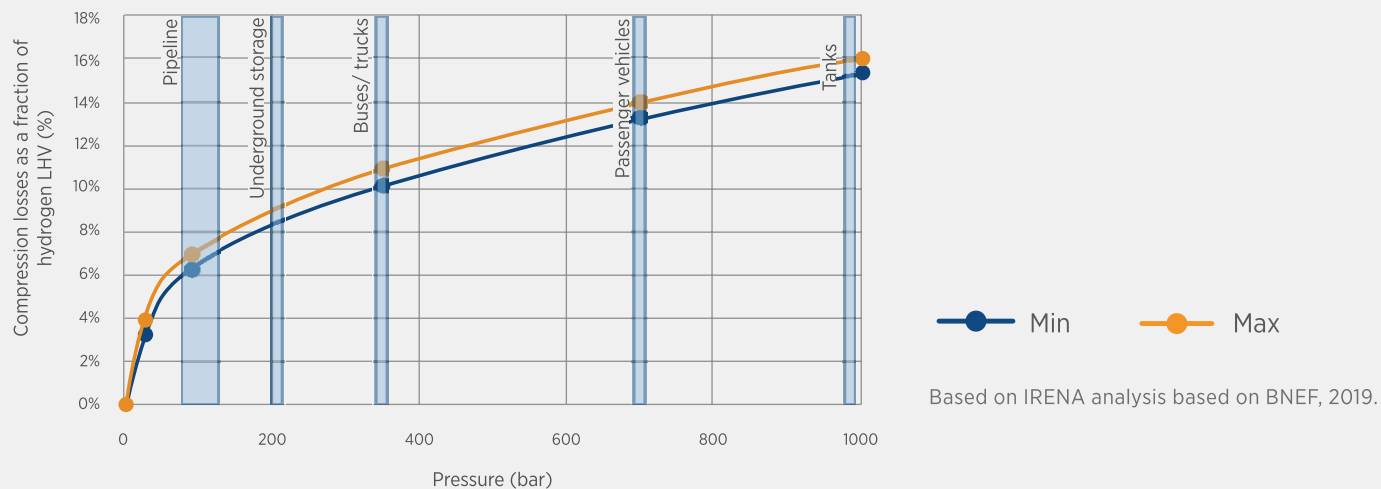
Izbira vrste kompresorja je ključna. Znano je, da je potrebna moč za črpanje sorazmerna tako z **gostoto** kot z **razmerjem stiskanja**. Ker ima vodik **najnižjo gostoto med vsemi plini**, je ta faza izjemno pomembna pri načrtovanju energijskih in finančnih potreb.

Ključen dejavnik pri zmanjšanju porabe energije v tej fazi je **tlak na izhodu iz elektrolizerja**. Višji kot je ta tlak, manj je potrebno naknadno stiskanje. Da bi bil postopek energetsko manj zahteven, je priporočljivo **izvesti čim večjo kompresijo že v fazi elektrolize**, saj je **vhodni medij tekoča voda**. Ker je ta skoraj nestisljiva, je njeno tlačenje bistveno manj energetsko potratno kot kompresija že proizvedenega plinastega vodika.

Predlagan pristop torej temelji na **strateškem upravljanju tlačnih pogojev v postopku elektrolize**, kar omogoča **znižanje celotne porabe energije sistema** na enoto proizvedenega vodika. To je še posebej pomembno pri **industrijskih sistemih velikega obsega**, kjer kompresija predstavlja **glavni obratovalni strošek**.

Spodaj (v izvirnem dokumentu) je prikazan **indikativni graf porabe energije v tej fazi** v odvisnosti od **tlaka na izhodu iz kompresorja**, ki se spreminja glede na **končni namen uporabe** [9].

Energy losses for the multi-stage mechanical compression of hydrogen.



Najpogostejši tehnologiji danes sta shranjevanje v jeklenkah in v kovinskih hidridih. Jeklenke za shranjevanje vodika so razdeljene v pet glavnih kategorij, imenovanih tip 1, 2, 3, 4 in 5, od katerih je vsaka določena z različnimi materiali in tehnologijami.

Jeklenke tipa 1 so v celoti izdelane iz jekla, robustnega in zanesljivega materiala, vendar težkega.

Zaradi tega so neučinkovite glede na razmerje med maso in kapaciteto, čeprav so ekonomične in široko uporabljene v stacionarnih sistemih, kjer masa ni ključen dejavnik.

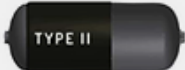
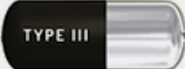
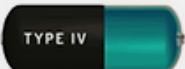
Jeklenke tipa 2 imajo kovinsko jedro, običajno iz jekla ali aluminija, ki je zunaj ojačano s kompozitnimi materiali. Ta zasnova omogoča zmanjšanje mase v primerjavi s tipom 1, ob ohranjeni dobri mehanski odpornosti.

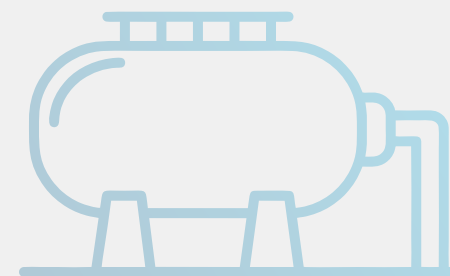
Jeklenke tipa 3 predstavljajo nadaljnji napredek, kjer je jedro iz aluminija, lahkega in odpornega, ovitega v kompozitno strukturo. Ta kombinacija jih naredi idealne za mobilne sisteme, kot so vozila na vodik, kjer je masa ključni dejavnik.

Jeklenke tipa 4 pa imajo polimerno jedro, ojačano s kompozitnimi materiali, popolnoma brez kovinskih delov. So najlažje in najbolj primerne za visoko učinkovite sisteme, vendar tudi najdražje za proizvodnjo.

Jeklenke tipa 5 predstavljajo novo tehnologijo, brez kovinskega jedra in v celoti iz kompozitnih materialov. So še v razvojni fazi, vendar zaradi svoje majhne mase in kapacitete shranjevanja obetajo širšo uporabo.

Na sliki spodaj so prikazane nekatere karakteristike jeklenk. Slika je povzeta s spleta. Za več informacij glej [14].

[95]	Sub-Type Classification	Liner	Wrap Extent	Winding Method	Resin Type	Fiber Type	Low Cost	Recyclability	Light Weight
	Type II—FSW ¹	Metal	Cylinder	Wet	TS	CF	+++	++++	+
	Type II—MSW	Metal	Cylinder	Wet	TS	SW	+++++	+++++	+
	Type III—FSW ¹	Metal	Full	Wet	TS	CF	+++	+++	++
	Type III—MSW	Metal	Full	Wet	TS	SW	++++	++++	+
	Type IV—FSW ¹	Plastic	Full	Wet	TS	CF	+	++	+++++
	Type IV—FST	Plastic	Full	Tape	TS	CF	+	++	+++++
	Type IV—FPT	Plastic	Full	Tape	TP	CF	+	+++	+++++
	Type IV—FPW	Plastic	Full	Wet	TP	CF	+	+++	+++++
	Type IV—MSW	Plastic	Full	Wet	TS	SW	++++	++++	+++
	Type V ²	Liner-less	Full	Tape	TS/TP	CF	++	++	+++++

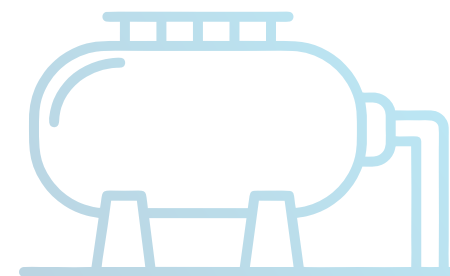
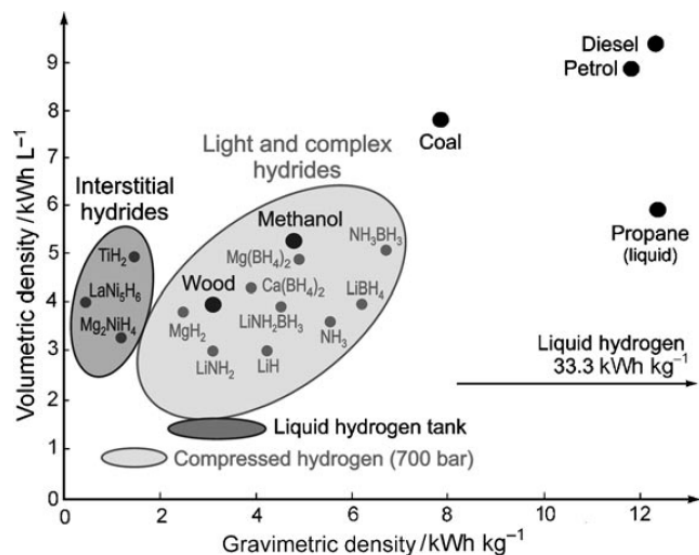


Alternativo jeklenkam predstavljajo kovinski hidridi, ki shranjujejo vodik v trdni obliki. Ti materiali absorbirajo vodik v svojo kristalno strukturo in ga ob segrevanju sproščajo. Nudijo visoko stopnjo varnosti in večjo gostoto shranjevanja v primerjavi z jeklenkami, vendar zahtevajo nadzorovane temperaturne in tlačne pogoje, zaradi česar je proces bolj kompleksen in dražji. Poleg tega so kovinski hidridi še vedno v fazi razvoja za komercialne sisteme večjega obsega, saj se soočajo z izzivi, povezanimi s stroški materiala in toplotnim upravljanjem.

Shranjevanje vodika v trdni obliki z uporabo adsorpcijskih materialov, kot so MOF-i (kovinsko-organski okvirji) in aktivna oglja, deluje prek fizikalne adsorpcije pri kriogenih temperaturah (77–150 K). Ti porozni materiali omogočajo hitro kinetiko in majhne energijske zahteve za sproščanje (20–30 kJ/mol), trenutno pa dosegajo raven tehnološke pripravljenosti TRL 4–5. Čeprav nudijo odlično varnost in stabilnost pri ciklični uporabi, so njihove glavne omejitve nizka gravimetrična kapaciteta (<5 % mase) in potreba po kriogenih pogojih. Napredni materiali, kot je MOF-210, dosegajo kapaciteto 0,075 g H₂/g pri 77 K in 100 bar, vendar praktična uporaba zahteva izboljšane sisteme za toplotno upravljanje. Raziskave se osredotočajo na optimizacijo poroznih struktur in razvoj hibridnih materialov za izboljšanje delovanja pri milejših pogojih.

Za zaključek lahko povzamemo, da so kompozitne jeklenke (tipa 3 in 4) trenutno najbolj uravnotežene rešitve za mobilne sisteme, medtem ko tipa 1 in 2 ostajata ustrezni za stacionarno uporabo. Tip 5 in kovinski hidridi predstavljajo obetavne tehnologije prihodnosti, vendar zahtevajo nadaljnji razvoj, da bi postale konkurenčne tako s stroškovnega kot tudi s tehnološkega vidika.

Slika prikazuje razmerja med volumsko in masno gostoto za različne snovi. Slika je povzeta iz [14].



TRANSPORT

Transport vodika, tako v plinasti kot v tekoči obliki, predstavlja enega ključnih izzivov za njegovo uvedbo kot energetskega nosilca v velikem obsegu. Tako transport v plinasti kot v tekoči obliki ponuja različne možnosti glede na logistične potrebe, količine, ki jih je treba obvladati, in razdalje, ki jih je treba premagati. Vsak način transporta ima značilne lastnosti, prednosti in omejitve, ki vplivajo na uporabnost v določenih kontekstih.

Transport plinastega vodika temelji predvsem na uporabi cevovodov ali visokotlačnih jeklenk. Cevovodi so še posebej primerni za transport na dolge razdalje in kapilarno distribucijo v industrijskih ali urbanih območjih. Namenske cevovodne mreže že obstajajo v nekaterih državah v Evropi in Severni Ameriki, kar dokazuje izvedljivost te rešitve. Vendar gradnja novih infrastrukturnih omrežij zahteva pomembne naložbe in uporabo posebnih materialov, ki so odporni na krhkost, ki jo povzroča vodik. Jeklenke se po drugi strani uporabljajo za cestni ali železniški transport, pogosto v skupkih, da se poveča kapaciteta. Ta način nudi veliko prilagodljivost, vendar je omejen s količino vodika, ki ga je mogoče prepeljati, in logističnimi stroški, še posebej pri prevozu velikih količin na dolge razdalje.

Pri transportu tekočega vodika se izkorišča večja energijska gostota vodika v tekoči obliki, ki zavzame bistveno manjši volumen v primerjavi s plinasto obliko. Tekoči vodik se prevaža v kriogenih rezervoarjih, zasnovanih tako, da med celotnim prevozom ohranjajo kriogene temperature ($-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, 20 K). Ta metoda je posebej učinkovita za aplikacije, ki zahtevajo velike količine vodika v omejenih prostorih, kot je vesoljski sektor ali nekatere industrijske uporabe. Vendar pa je proces utekočinjanja zelo energetsko zahteven in drag, ohranjanje kriogenih temperatur med transportom pa zahteva napredno tehnologijo in visoko učinkovite izolacijske materiale. Kljub tem izzivom je transport tekočega vodika uveljavljena rešitev v okoljih, kjer je energijska gostota ključnega pomena.

Z vidika stroškov je transport plinastega vodika po cevovodih na splošno cenejši pri daljših razdaljah, vendar zahteva visoke začetne naložbe za izgradnjo infrastrukture. Jeklenke so pri večjih količinah in dolgih razdaljah dražje zaradi logističnih stroškov. Transport tekočega vodika ima visoke obratovalne stroške, povezane s procesom utekočinjanja in s tehnologijo, potrebno za ohranjanje kriogenih pogojev.

Z vidika tehnološke zrelosti sta obe metodi dobro uveljavljeni. Transport v plinasti obliki se uporablja že desetletja, z mrežami cevovodov in visokotlačnimi jeklenkami, ki se uporabljajo v različnih sektorjih.



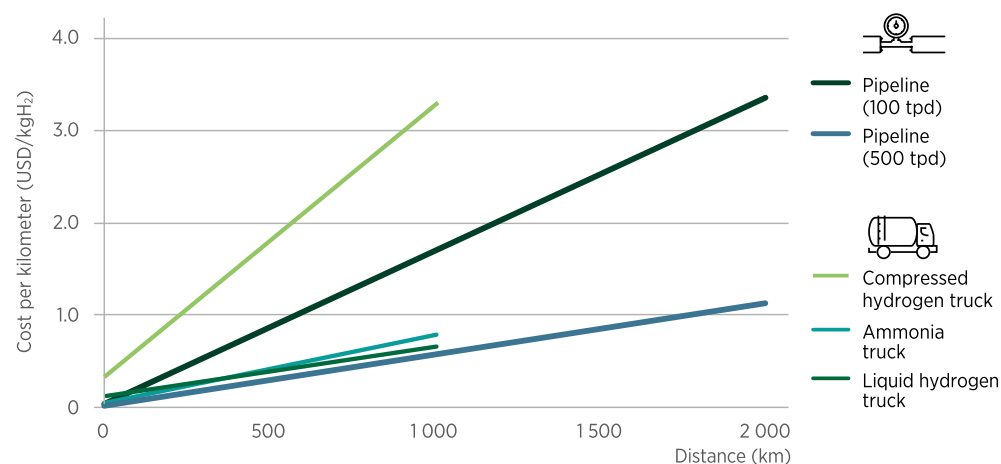
Transport tekočega vodika pa je zrela tehnologija v specializiranih kontekstih, kot je vesoljska industrija, vendar zahteva bolj kompleksno in dražjo infrastrukturo.

Kar zadeva kompleksnost, je transport tekočega vodika nedvomno zahtevnejši, saj zahteva kriogeno infrastrukturo in napredne izolacijske materiale. Transport v plinasti obliki je enostavnejši, vendar zahtevajo cevovodi specializirane materiale, da se prepreči problem krhkosti zaradi vodika.

Izbira med transportom v plinasti ali tekoči obliki je odvisna od specifičnih potreb, razdalje in količine vodika, ki jo je treba prepeljati. Medtem ko je plinasti transport idealen za distribucijska omrežja in stacionarne sisteme, je transport tekočega vodika bolj primeren, kadar sta pomembna energijska gostota in prostorska učinkovitost. Obe metodi igrata ključno vlogo v sistemu transporta vodika in prispevata k njegovi širši uveljavitvi kot trajnostnega energetskega nosilca.

Slika spodaj prikazuje ceno transporta vodika v odvisnosti od razdalje za transport tekočega in plinastega vodika. Slika je povzeta iz tehničnega poročila IRENA, 2021 [16].

Costs for hydrogen transport as a function of the distance by selected transport mode



Notes: Costs presented do not include conversion costs. Final costs in any transport mode depend on many variables and the values here presented are indicative. Weighted average cost of capital = 7%; useful life of infrastructure = 20 years; tpd = tonnes per day.

Source: Elaborated from IEA (2019); Nazir et al. (2020); Singh, Singh and Gautam (2020); Teichmann, Arlt and Wasserscheid (2012).



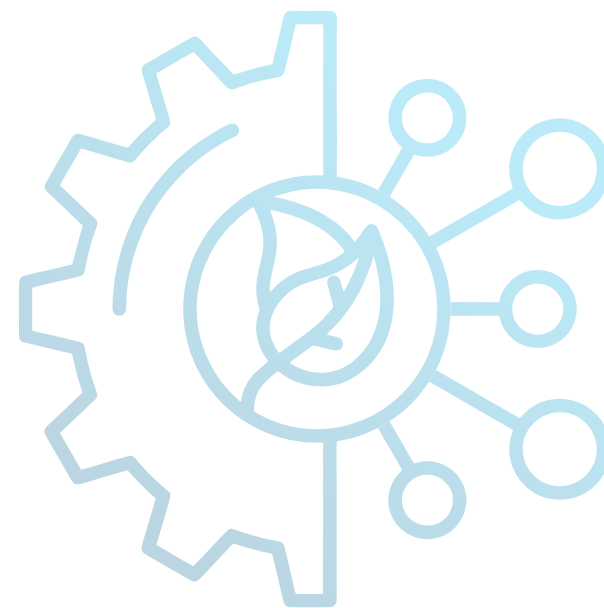
DISTRIBUCIJA VODIKA

Distribucijski sistemi za vodik so temeljni element za zagotavljanje oskrbe in uporabe tega energetskega nosilca za trajnostno mobilnost, industrijo in proizvodnjo električne energije. Distribucija vodika poteka predvsem preko polnilnic, ki morajo biti zasnovane tako, da zagotavljajo učinkovitost, varnost in hitre čase polnjenja, zlasti v okoljih z visoko potrebo, kot so javni prevoz ali gospodarska vozila. Na tem področju izstopata dve glavni konfiguraciji: sistem z enim rezervoarjem in kaskadni sistem z več rezervoarji. Te rešitve se razlikujejo ne le po kompleksnosti in stroških, temveč tudi po vplivu na moč kompresije in porabo energije, kar so ključni vidiki za obratovalno učinkovitost in ekonomsko vzdržnost celotne distribucijske verige.

V kaskadnem sistemu z več rezervoarji uporaba več rezervoarjev z različnimi tlaki omogoča optimizacijo procesa kompresije. Med polnjenjem se vodik prenaša iz visokotlačnih rezervoarjev v rezervoarje s srednjim tlakom in nato v vozilo, kar zmanjšuje potrebo po dodatni sprotni kompresiji. Tak pristop zmanjšuje potrebno moč kompresorja in s tem tudi skupno porabo energije, saj izkorišča že obstoječe tlake v rezervoarjih. Poleg tega postopno upravljanje tlakov zmanjšuje energijske izgube med prenosom, kar izboljšuje učinkovitost sistema.

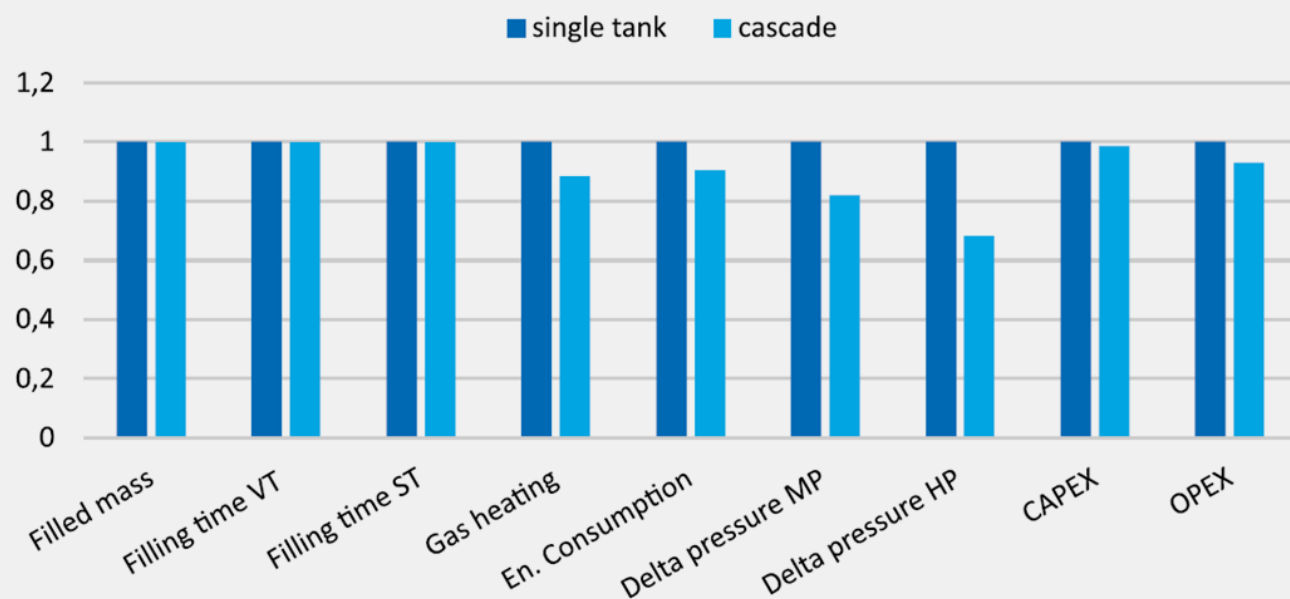
Nasprotno pa sistem z enim rezervoarjem zahteva neprekinjeno kompresijo za vzdrževanje stalnega visokega tlaka, potrebnega za zagotavljanje sprejemljivih časov polnjenja. To pomeni večjo porabo energije, saj mora kompresor delovati s polno zmogljivostjo, da nadomesti padec tlaka med prenosom vodika. V okoljih z veliko potrebo, kot so polnilne postaje za avtobuse, lahko ta konfiguracija vodi do pomembnih energetskih konic, poveča obratovalne stroške in zmanjša skupno učinkovitost.

Izbira med obema rešitvama ima torej neposredne posledice na moč kompresije in porabo energije. Kaskadni sistem, čeprav bolj kompleksen in dražji za izvedbo, ponuja energetsko prednost zaradi zmanjšane potrebe po kompresorski moči in optimiziranega upravljanja tlakov. To ga naredi še posebej primerne za velike sisteme, kot je polnjenje avtobusov, kjer sta energetska učinkovitost in čas polnjenja ključna dejavnika. Sistem z enim rezervoarjem je po drugi strani enostavnejši in cenejši v začetni fazi, vendar je lahko energetsko manj učinkovit, zlasti v okoljih z veliko potrebo.



Izbira med obema konfiguracijama mora upoštevati ne le začetne stroške in kompleksnost upravljanja, temveč tudi vpliv na moč kompresije in porabo energije, ki sta ključna dejavnika za ekonomsko in okoljsko vzdržnost infrastrukture za vodik.

Slika spodaj prikazuje primerjavo med enojnim rezervoarjem in kaskadnim sistemom. Slika je povzeta iz Caponi [17], več informacij v članku.



Normalized comparison between single-tank and cascade system for the most important techno-economic parameters.

RAZLIČNE KONČNE UPORABE

Razvoj vodikovega ekosistema v alpskem okolju ima določene slabosti, kot so manjša razpoložljivost prostora in/ali višji stroški zemljišč, nižja sončna obsevanost, ostre podnebne in geografske razmere (strme ceste, prisotnost snega itd.). Vsi ti dejavniki zmanjšujejo stroškovno konkurenčnost proizvodnje zelenega vodika v primerjavi s podobnimi ekosistemi v nižinah. Kljub temu je osnovno vodilo, da se vodik uporablja tam, kjer sistema ni mogoče elektrificirati.

V Alpah je razlika med alpskimi dolinami in oddaljenimi (odročnimi) območji ali visokogorskimi zavetišči, kjer je nizka gostota prebivalstva in otežen dostop.

V primeru dna dolin ali širokih dolin, kjer je (relativno) na voljo prostor in viri, veljajo enaka ekonomska merila kot v nižinskih območjih, ob upoštevanju logističnih težav in značilnosti terena. Glavna razlika je povezana z uporabo v transportu, kjer imajo težka električna vozila lahko slabše zmogljivosti zaradi strmin ali zelo nizkih temperatur. Vendar je potrebna temeljita ocena celotne oskrbovalne verige tako z vidika energije kot tudi ekonomske učinkovitosti.

V transportu je vodik še posebej primeren za pogon težkih ali servisnih vozil, kot so terenska vozila, vozila za vzdrževanje železniških prog ali vozila za prevoz blaga na težko dostopnih območjih. V teh primerih se lahko elektrifikacija izkaže za nepraktično zaradi dolgih razdalj, pomanjkanja polnilne infrastrukture ali nizkih temperatur, ki zmanjšujejo učinkovitost baterij. V območjih z zelo težkimi podnebnimi razmerami bodo rešitve za mobilnost verjetno temeljile na motorjih z notranjim izgorevanjem in ne na gorivnih celicah.

Druga možnost je uporaba sistemov za shranjevanje energije na osnovi vodika za integracijo lokalnih obnovljivih virov, kot so majhne hidroelektrarne, vetrne ali sončne elektrarne. V teh območjih je lahko proizvodnja obnovljive energije prekinjena ali presega lokalno porabo. Vodik, proizveden z elektrolizo v obdobjih energijskega presežka, se lahko shrani in nato po potrebi ponovno pretvori v električno energijo preko gorivnih celic ter tako zagotovi stabilno in neprekinjeno oskrbo z energijo. Vendar ta uporaba ne bi smela predstavljati standarda z vidika ekonomske donosnosti, saj kaže nizke faktorje izkoriščenosti in veliko negotovost glede donosnosti naložbe iz že opisanih razlogov. Ti sistemi naj se torej obravnavajo kot storitev za oskrbo z energijo, lastno porabo in čim boljši izkoristek lokalnih virov, nikakor pa kot ekonomska naložba.



Poleg sektorja, ki ga je težko dekarbonizirati (Hard-to-Abate), vključujejo druge uporabe tudi oskrbo z energijo za ogrevanje v gospodinjstvih na skrajno odročnih območjih, kot so alpska zavetišča. Tudi ta uporaba ni ekonomsko konkurenčna v primerjavi s konvencionalnimi rešitvami, zato naj bi se tovrstne rešitve uporabljale le v neugodnih razmerah.

Naslednja tabela prikazuje zahteve glede čistosti vodika za različne končne uporabe:

Uporaba	Zahtevana čistost	Tipična tehnologija elektrolizerja
Gorivne celice	≥99,999 % (razred 5.0)	PEM, SOEC
Neposredno zgorevanje	≥99,9 % (razred 3.0)	Alkalni (z dodatnim čiščenjem), AEM, PEM
Shranjevanje v kovinskih hidridih	≥99,99 % (razred 4.0)	PEM, AEM, Alkalni (z dodatnim čiščenjem)



4 TEHNIČNO-EKONOMSKA OCENA



Ko so tehnične spremenljivke opredeljene in sta presojana potencial ponudbe in povpraševanja, je mogoče nadaljevati z ekonomsko oceno. Za oceno izvedljivosti projekta v predhodni fazi je zelo priporočljivo neposredno zaprositi za ponudbe podjetja, ki proizvajajo zahtevano tehnologijo. Stroški iste tehnologije se lahko bistveno razlikujejo glede na proizvajalca. V tej fazi razvoja vodikovega ekosistema je negotovost glede cen dejavnik, ki ni zanemarljiv; pogosto je celo odločilen. Večja kot je natančnost informacij o stroških, bolj natančne bodo napovedi ekonomskih tokov skozi celotno življenjsko dobo projekta. To lahko pomeni razliko med uspešnim in donosnim projektom ter neuspešnim in izgubljenim.



Strošek vodika je odvisen od več dejavnikov in je med državami – celo znotraj Evrope – izjemno različen. Odvisen je od:

- možnosti energetske infrastrukture,
- cene kilovatne ure električne energije,
- razpoložljivosti spodbujevalnih ukrepov na evropski, nacionalni in lokalni ravni,
- pravne ureditev, ki velja na območju,
- zrelosti izbrane tehnologije in
- tehnične usposobljenosti dobavitelja opreme.

V zvezi s tem je priporočljiva uporaba orodja za finančno oceno H2FAsT, ki je bilo razvito v okviru projekta AMETHyST in je dostopno na platformi SkHyline. Orodje je zasnovano za maksimiranje učinkovitosti in uspešnosti proizvodnje vodika glede na razpoložljivo količino obnovljive energije in to brez podpore omrežja. Orodje ne podaja konkretna projektna priporočila, ampak zagotavlja konfiguracijo naprave, ki maksimalno izboljšuje ekonomsko vzdržnost proizvodnega obrata za vodik glede na izbrana tehnična in ekonomska optimizacijska merila.

Proizvodnja zelenega vodika na ekonomsko vzdržen način ni samoumevna. Prekinjenost proizvodnje energije iz obnovljivih virov, odločitve pri načrtovanju naprav in zlasti konfiguracija posameznih elementov imajo ključno vlogo. Zato je to orodje izredno pomembno v začetni fazi, saj pomaga oceniti stopnjo tveganja na podlagi razpoložljivih virov.

Na platformi SkHyline je mogoče dostopati do samega orodja za ocenjevanje, kot tudi do smernic in video vodiča, ki korak za korakom prikazuje uporabo orodja na realnih primerih.





- [1] Proizvodnja vodika s parno reformacijo z zajemanjem CO₂, Collodi & Wheeler, Chemical Engineering Transactions, 2010
- [2] Onesnaževala zraka in emisije toplogrednih plinov iz proizvodnje vodika v ZDA z reformacijo metana s paro, Young et al., Environmental Science & Technology, 2019
- [3] Analiza stroškov proizvodnje vodika pri reformaciji metana s paro ob upoštevanju integracije z elektrolizo in zajemanjem CO₂, Katebah et al., Cleaner Engineering and Technology, 2022
- [4] Emisije toplogrednih plinov pri proizvodnji vodika in njegovih derivatov – Global Hydrogen Review 2024 – IEA
- [5] Različne vloge neposredne in posredne elektrifikacije na poti k energetskega sistema, temelječemu na obnovljivih virih, Schreyer et al., One Earth, 2024
- [6] IRENA tehnično poročilo: Dekarbonizacija težko razogljičljivih sektorjev z OVE, 2024
- [7] Kompromisi pri porabi vode in emisijah toplogrednih plinov v življenjskem ciklu različnih poti proizvodnje vodika, Eniksen et al., Hydrogen Energy, 2024
- [8] IEA tehnično poročilo: Svetovni energetski pregled, 2023
- [9] IRENA tehnično poročilo: Zmanjšanje stroškov proizvodnje zelenega vodika, 2020
- [10] IEA tehnično poročilo: Globalni pregled vodika 2023, 2024
- [11] Koponen et al., Nadzor in energijska učinkovitost PEM elektrolizerjev v sistemih z obnovljivimi viri energije, International Journal of Hydrogen Energy, 2017
- [12] Avril et al., Večkriterijska optimizacija baterij in tehnologij za shranjevanje vodika za oddaljene fotonapetostne sisteme, Energy, 2010
- [13] Ibáñez-Rioja et al., Metodologija simulacije za samostojen sončni sistem z baterijo in elektrolizerjem: Sočasna optimizacija kapacitet komponent in nadzora sistema, Applied Energy, 2022
- [14] <https://www.addcomposites.com/post/types-of-hydrogen-tanks-technological-differences-and-advantages-explained>
- [15] Kuznetsov & Edwards, Funkcionalni materiali za trajnostne energetske tehnologije: Štiri študije primerov, Chemsuschem, 2010
- [16] IRENA tehnično poročilo: Oskrba z zelenim vodikom, 2021
- [17] Caponi et al., Shranjevanje v enem rezervoarju v primerjavi s kaskadnim sistemom z več rezervoarji na vodikovih polnilnicah za avtobuse na gorivne celice, International Journal of Hydrogen Energy, 2022

ODGOVORNI PARTNER ZA PRIPRAVO SMERNIC



Agencija za energijo Furlanije-Juljske krajine
(APE FVG)
Via Santa Lucia 19, 33013 Gemona del Friuli,
Udine, Italija
Telefon: (+39) 0432 980322
E-pošta: matteo.depliccoli@aape.fvg.it

VODILNI PARTNER PROJEKTA



**Auvergne
Rhône-Alpes**
Énergie Environnement

Agencija za energijo regije Auvergne-Rhône-Alpes
(AURA-EE)
Rue Gabriel Péri 18, 69100 Villeurbanne,
Francija
Telefon: (+33) 0478372914, +33 0472563365
E-pošta: etienne.vienot@auvergnerhonealpes-ee.fr;
maxime.penazzo@auvergnerhonealpes-ee.fr

K NASTANKU DOKUMENTA SO PRISPEVALI TUDI



<https://www.tenerdis.fr>



<https://www.fbk.eu>



<https://www.agenziacasaclima.it>



<https://www.standort-tirol.at>



<https://www.provincia.tn.it>



<https://energiewende-oberland.de>



<https://www.energap.si>



<https://blueark.ch>

Interreg
Alpine Space



Co-funded by
the European Union

AMETHyST

Projekt je sofinanciran iz Evropskega sklada za regionalni razvoj v okviru programa Interreg Alpine Space

