

VIŠJA STROKOVNA ŠOLA ACADEMIA
MARIBOR

Vodik kot prihodnost plinovodnih omrežij: Implementacija in tehnične smernice

Kandidat: Tadej Črnčec

Vrsta študija: študent izrednega študija

Študijski program: Strojništvo

Mentor predavatelj: dr. Darko Friščić, univ. dipl. gosp. inž.

Mentor v podjetju: Damijan Bedek, univ. dipl. inž. str.

Lektorica: Anja Lipovšek, prof. slov.

Maribor, april 2025

IZJAVA O AVTORSTVU DIPLOMSKEGA DELA

Podpisani Tadej Črnčec sem avtor diplomskega dela z naslovom Vodik kot prihodnost plinovodnih omrežij: Implementacija in tehnične smernice, ki sem ga napisal pod mentorstvom dr. Darka Friščića, univ. dipl. gosp. inž.

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- je predloženo delo izključno rezultat mojega dela,
- sem poskrbel/a, da so dela in mnenja drugih avtorjev, ki jih uporabljam v predloženi nalogi, navedena oz. citirana skladno s pravili Višje strokovne šole Academia Maribor,
- se zavedam, da je plagiatorstvo – predstavljanje tujih del oz. misli kot moje lastne, kaznivo po Zakonu o avtorski in sorodnih pravicah (Uradni list RS, št. 16/07 – uradno prečiščeno besedilo, 68/08, 110/13, 56/15 in 63/16 – ZKUASP); prekršek pa podleže tudi ukrepom Višje strokovne šole Academia Maribor skladno z njenimi pravili,
- skladno z 32.a členom ZASP dovoljujem Višji strokovni šoli Academia Maribor objavo diplomskega dela na spletnem portalu šole.

Maribor, april 2025

Podpis študenta:

ZAHVALA

Pri nastajanju diplomskega dela bi se rad iz srca zahvalil mentorjema, gospodu dr. Darku Friščiću, in Damijanu Bedeku, za njuno strokovno vodenje in dragocene nasvete.

Posebno zahvalo izrekam podjetju Plinarna Maribor, d. o. o., za finančno podporo med študijem ter za razumevanje in podporo sodelavcev v času mojega izobraževanja.

Hvaležnost izražam tudi svoji družini, sorodnikom, prijateljem in znancem, ki so mi ves čas stali ob strani, me spodbujali in mi pomagali. Vsem skupaj najlepša hvala.

POVZETEK

Diplomsko delo raziskuje vodik kot energent prihodnosti v plinovodnih omrežjih, s poudarkom na njegovi implementaciji in tehničnih smernicah. V kontekstu globalnih podnebnih ciljev in trajnostne energetske tranzicije vodik predstavlja eno najbolj obetavnih rešitev za razogljičenje energetskega sektorja. V delu so analizirane glavne prednosti vodika, predvsem njegov potencial za popolno odpravo emisij ogljikovega dioksida pri uporabi, ter vloga zelenega vodika, proizvedenega iz OVE, ki omogoča trajnostno energetske oskrbo.

Vodik kljub svojim prednostim prinaša tudi izzive, ki so povezani z njegovo implementacijo v obstoječa plinovodna omrežja, zasnovana za prenos zemeljskega plina (ZP). Med glavnimi tehničnimi izzivi so združljivost materialov, odpornost na vodikovo krhkost ter potreba po prilagoditvah kompresorskih in regulacijskih postaj. Delo obravnava tudi ekonomske in varnostne vidike, ki so ključni za uspešno uvajanje vodika v energetske sisteme.

Obdelana je analiza trenutnega stanja plinovodnih omrežij in njihova pripravljenost na prehod na vodik. Diplomsko delo raziskuje, kako lahko tehnološke nadgradnje in uvajanje novih standardov zagotovijo varno in učinkovito uporabo vodika. Med drugim so prikazane možnosti za prenos čistega vodika in mešanic z ZP kot tudi študije, ki dokazujejo, da lahko uporaba vodika bistveno prispeva k zmanjšanju emisij toplogrednih plinov in izboljšanju kakovosti zraka.

Raziskava izpostavlja tudi politične in družbene dejavnike, ki bodo igrali ključno vlogo pri prehodu na vodikovo gospodarstvo. Dolgoročni uspeh bo odvisen od podpore zakonodajalcev, gospodarskih subjektov in širše javnosti. Pomembna bosta tudi mednarodno sodelovanje in razvoj enotnih standardov za varno uporabo vodika v plinovodnih omrežjih. Tehnološki napredek, finančne spodbude in strateško načrtovanje bodo ključni za uspešno vključitev vodika v energetski sektor. Celovit pristop k prehodu bo omogočil razogljičenje industrije in gospodinjstev ter povečanje energetske neodvisnosti.

Diplomsko delo ponuja celovit pregled o priložnostih in izzivih, povezanih z uvajanjem vodika kot energenta prihodnosti, ter prispeva k razumevanju njegove vloge v trajnostnem energetskega sistemu.

Ključne besede: *vodik, zemeljski plin, plinovodna omrežja, trajnost, zeleni vodik*

ABSTRACT

Hydrogen as the Future of Pipeline Networks: Implementation and Technical Guidelines

The thesis explores hydrogen as the energy carrier of the future in pipeline networks, focusing on its implementation and technical guidelines. In the context of global climate goals and the transition to sustainable energy, hydrogen represents one of the most promising solutions for decarbonizing the energy sector. The thesis analyzes the main advantages of hydrogen, particularly its potential to completely eliminate CO₂ emissions during use, and the role of green hydrogen, produced from renewable energy, which enables sustainable energy supply.

Despite its advantages, hydrogen also presents challenges related to its integration into existing pipeline networks designed for natural gas transport. Key technical challenges include material compatibility, resistance to hydrogen embrittlement and the need for adaptations in compressor and reducing stations. The thesis also examines the economic and safety aspects that are critical for the successful implementation of hydrogen into energy systems.

The analysis addresses the current state of pipeline networks and their readiness for the transition to hydrogen. The thesis investigates how technological upgrades and the introduction of new standards can ensure the safe and efficient use of hydrogen. Additionally, it presents possibilities for transporting pure hydrogen and hydrogen-natural gas blends, as well as studies demonstrating that the use of hydrogen can significantly reduce greenhouse gas emissions and improve air quality.

The research also highlights political and social factors that will play a crucial role in the transition to a hydrogen economy. Long-term success will depend on the support of policymakers, economic stakeholders, and the general public. International cooperation and the development of unified standards for the safe use of hydrogen in pipeline networks will also be essential. Technological progress, financial incentives, and strategic planning will be key to the successful integration of hydrogen into the energy sector. A comprehensive approach to the transition will enable decarbonization of industries and households while enhancing energy independence.

The thesis provides a comprehensive overview of the opportunities and challenges associated with introducing hydrogen as the energy carrier of the future, contributing to a better understanding of its role in a sustainable energy system.

Keywords: *Hydrogen, natural gas, pipeline networks, sustainability, green hydrogen*

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	12
1.1	OPIS PODROČJA IN OPREDELITEV PROBLEMA	12
1.2	NAMEN, CILJI IN OSNOVNE TRDITVE	12
1.3	PREDPOSTAVKE IN OMEJITVE	13
1.4	UPORABLJENE RAZISKOVALNE METODE	14
2	ZEMELJSKI PLIN IN VODIK KOT ENERGENTA.....	15
2.1	ZEMELJSKI PLIN (ZP).....	15
2.1.1	<i>Lastnosti in sestava zemeljskega plina</i>	<i>15</i>
2.1.2	<i>Uporaba zemeljskega plina v energetskega sektorju</i>	<i>16</i>
2.1.3	<i>Okoljski vpliv zemeljskega plina.....</i>	<i>17</i>
2.1.4	<i>Alternative zemeljskemu plinu</i>	<i>18</i>
2.2	VODIK.....	20
2.2.1	<i>Lastnosti vodika.....</i>	<i>20</i>
2.2.2	<i>Pridobivanje vodika.....</i>	<i>21</i>
2.2.3	<i>Uporaba vodika v energetskega sektorju.....</i>	<i>22</i>
2.2.4	<i>Okoljski vpliv vodika in prispevek k zmanjšanju emisij</i>	<i>23</i>
3	PREGLED OBSTOJEČEGA STANJA PLINOVODNIH OMREŽIJ IN NJIHOVE PRIPRAVLJENOSTI NA PREHOD NA VODIK	26
3.1	TEHNIČNE ZNAČILNOSTI OBSTOJEČIH PLINOVODOV	26
3.2	MATERIALI IN KONSTRUKCIJA PLINOVODOV	27
4	ANALIZA POTREBNIH SPREMEMB ZA IMPLEMENTACIJO VODIKA V OBSTOJEČE OMREŽJE	35
4.1	PROIZVODNJA ZELENEGA VODIKA	35
4.2	PRENOS VODIKA	37
4.2.1	<i>Zmogljivost plinovodov pri prehodu na vodik</i>	<i>37</i>
4.3	KOMPRESORSKE IN MERILNO REGULACIJSKE POSTAJE.....	39
4.3.1	<i>Kompresorske postaje in prilagoditve</i>	<i>39</i>
4.3.2	<i>Regulacijske postaje (RP) in prilagoditve</i>	<i>42</i>
4.4	SHRANJEVANJE VODIKA	44
4.4.1	<i>Podzemno shranjevanje vodika</i>	<i>44</i>
4.5	VPLIV VODIKA NA MATERIALE CEVOVODOV IN NJEGOVI UČINKI.....	46
4.5.1	<i>Študije o vplivu vodika na materiale.....</i>	<i>47</i>
4.6	VARNOSTNI UKREPI ZA VKLJUČEVANJE VODIKA V OBSTOJEČE PLINOVODNE SISTEME	49
4.7	RAZŠIRJEN SCENARIJ ZA VZPOSTAVITEV PROIZVODNJE ZELENEGA VODIKA.....	50

5	PREGLED IN UPORABA TEHNIČNIH SMERNIC ZA KOMPONENTE PLINOVODNEGA SISTEMA	54
6	OCENA STROŠKOV IN KORISTI UVEDBE VODIKA V PLINOVODNA OMREŽJA	60
6.1	KROVNA TEMA »TRAJNOST«.....	60
6.2	TRAJNOSTNI ENERGETSKI PREHOD IN VLOGA VODIKA	60
6.2.1	<i>REPowerEU in nadgradnja evropske vodikove strategije.....</i>	<i>61</i>
6.2.2	<i>Evropska vodikova banka kot finančni instrument</i>	<i>62</i>
6.2.3	<i>Opozorilo Evropskega računskega sodišča</i>	<i>63</i>
6.2.4	<i>Sprejemljivost vodikovih tehnologij v družbi.....</i>	<i>64</i>
7	SKLEP	66
8	VIRI	68

KAZALO SLIK

SLIKA 1:	NASTANEK IN UPORABA BIOMETANA.....	18
SLIKA 2:	POSTOPEK METANACIJE	19
SLIKA 3:	BARVE VODIKOV IN NJHOVO PRIDOBIVANJE	22
SLIKA 4:	JEKLENE CEVI	27
SLIKA 5:	RAZLIČNE DIMENZIJE POLIETILENSKE CEVI (PE-HD)	28
SLIKA 6:	KROGELNA PIPA JEKLO – POLIETILEN PODZEMNA ZA DISTRIBUCIJSKI PLINOVOD.....	29
SLIKA 7:	ZASUN JEKLO – POLIETILEN ZA DISTRIBUCIJSKI PLINOVOD	30
SLIKA 8:	RAZLIČNI TIPI FAZONSKIH KOSOV	31
SLIKA 9:	ELEKTROLIZA – KOMPRESIJA – PRENOS/SHRANJEVANJE	35
SLIKA 10:	SHEMA ALKALNEGA ELEKTROLIZATORJA	36
SLIKA 11:	SHEMA PEM ELEKTROLIZATORJA	36
SLIKA 12:	KOMPRESORSKA POSTAJA ZA ZP "LIPPE"	39
SLIKA 13:	BATNI KOMPRESOR NA VODIK (VHODNI TLAK 24 BAR – IZHODNI TLAK 52–75 BAR Z MOČJO MOTORJA 3MW).....	41
SLIKA 14:	TURBOKOMPRESOR NA VODIK	42
SLIKA 15:	TESTIRANA REGULACIJSKA POSTAJA	43
SLIKA 16:	SHRANJEVANJE V POROZNIH KAMNINAH.....	45
SLIKA 17:	SHRANJEVANJE V SOLNIH JAMAH.....	45
SLIKA 18:	DIFUZIJA VODIKA V KOVINSKO MIKROSTRUKTURO.....	47
SLIKA 19:	RAZPOKA V OBLIKI "OKNA" IZ ŠTUDIJE	48

KAZALO TABEL

TABELA 1: VREDNOSTI POTENCIALA GLOBALNEGA SEGREVANJA (GWP) ZA OBDOBJE 20 IN 100 LET ZA RAZLIČNE TOPLOGREDNE PLINE. KER GWP MERI VPLIV SEGREVANJA EMISIJ ENE TONE PLINA V PRIMERJAVI Z ENO TONO OGLJIKOVEGA DIOKSIDA, SO VREDNOSTI ZA OGLJIKOV DIOKSID (CO ₂) VEDNO ENAKE 1.	24
--	----

KAZALO GRAFIKONOV

GRAF 1: SESTAVA ZMESI V ZP PLINOVODOV PLINARNE MARIBOR.....	16
GRAF 2: TLAČNA KRIVULJA PRI PRENOSU METANA IN VODIKA Z ENAKO ENERGIJSKO VSEBNOSTJO V VISOKOTLAČNEM PLINOVODU DOLŽINE 100 KM IN PREMERA 1.000 MM	38
GRAF 3: PRENOS ENERGIJE PRI ENAKI TLAČNI IZGUBI	38
GRAF 4: GRAF POVPRASEVANJA PO VODIKU IN PROIZVODNJA ZELENEGA VODIKA	51
GRAF 5: POVPRASEVANJE PO VODIKU IN PROIZVODNJA ZELENEGA IN SIVEGA VODIKA	52
GRAF 6: KAPACITETE SKLADIŠČENJA IN ČRPANJA VODIKA	53

Seznam uporabljenih okrajšav:

NEPN – Nacionalni energetski in podnebni načrt

ZP – zemeljski plin

CNG – Compressed natural gas

UNP – utekočinjeni naftni plin

LNG – Liquefied natural gas

SMR – Steam Methane Reforming

CCS – Carbon Capture and Storage

OVE – obnovljivi viri energije

GWP – Global Warming Potential

PE – polietilen

PE-HD – Polyethylene High-Density

MRP – merilno-regulacijske postaje

MP – merilna postaja

RP – regulacijska postaja

PEM – Proton Exchange Membrane

PN – Pressure Nominal

DN – Diameter Nominal

HELP – Hydrogen Enhanced Localized Plasticity

HEDE – Hydrogen Enhanced Decohesion

THyGA – Testing Hydrogen Admixtures for Gas Appliances

CEN/TC – Comité Européen de Normalisation/Technical Committee

WG – Working group

GERG – Groupe Européen de Recherches Gazières

PED – Pressure Equipment Directive

SMS – Safety Management System

PIMS – Pipeline Integrity Management System

LOHC – Liquid organic hydrogen carrier

EU – Evropska unija

RRF – Recovery and Resilience Facility

ETS – Emissions Trading System

FCH 2 JU – Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking

HFC – Hydrogen and Fuel Cells

mSPTE – mikro soproizvodnja toplote in elektrike

FCEV – Fuel Cell Electric Vehicles

PM2.5 – Particulate matter s premerom 2,5 mikromov

vol % – volumski delež

Seznam uporabljenih enot:

Sm^3 – standardni kubični metri

mbar – milibar

Kg/Sm^3 – kilogram na standardni kubični meter

MJ/Sm^3 – mega Joul na standardni kubični meter

$\text{gCO}_2/\text{kWh}_e$ – gram ekvivalenta ogljikovega dioksida na kilovatno uro proizvedene električne energije

MWh – megavatna ura

MW_e – megavat električne moči

Nm^3/h – normalni kubični meter na uro

Seznam uporabljenih kemijskih formul:

KOH – kalijev hidroksid

NaOH – natrijev hidroksid

OH^- – hidroksidni ion

H_2O – voda

H_2 – vodik

O_2 – kisik

1 UVOD

Leta 2015 je bil sprejet Pariški sporazum, ki predstavlja ključni globalni dogovor za omejevanje podnebnih sprememb. Njegov glavni cilj je zmanjšanje emisij toplogrednih plinov in omejitev dviga globalne temperature na največ 2 °C, s prizadevanji za omejitev na 1,5 °C glede na predindustrijsko raven. Evropska unija se je v skladu s tem sporazumom zavezala k podnebni nevtralnosti do leta 2050, pri čemer naj bi se do leta 2030 emisije toplogrednih plinov zmanjšale za vsaj 55 % glede na ravni iz leta 1990 (Amanatidis & Petit, 2024).

Eden ključnih ukrepov za doseganje teh ciljev je prehod na čistejšo energetske rešitve, pri čemer ima pomembno vlogo vodik. Evropski parlament je leta 2021 sprejel resolucijo o evropski strategiji za vodik, v kateri je opredeljena potreba po vzpostavitvi trajnostne vodikove ekonomije. Dokument poudarja, da mora proizvodnja vodika temeljiti večinoma na OVE ter da je potrebno vlagati v razvoj infrastrukture in regulativnega okvira, ki bo omogočil varno in učinkovito uporabo vodika v industriji in prometu (Evropski parlament, 2021).

Tudi Slovenija sledi tem ciljem in si v skladu z NEPN prizadeva zmanjšati odvisnost od fosilnih goriv. Vlada Republike Slovenije je v letu 2020 sprejela odločitev, da bo do leta 2030 v prenosnem in distribucijskem omrežju dosežen vsaj 10-odstotni delež sintetičnega metana ali vodika obnovljivega izvora. Pri tem bo ključno vlogo imela izvedba pilotnih projektov za proizvodnjo in uporabo vodika, kar bo prispevalo k večji energetske samooskrbi in zmanjšanju emisij toplogrednih plinov (Plinovodi, 2024).

1.1 Opis področja in opredelitev problema

Vodik kot energent postaja vse pomembnejši v kontekstu globalnih prizadevanj za zmanjšanje emisij toplogrednih plinov in doseganje trajnostnega energetskega prehoda. Kljub njegovemu velikemu potencialu pa integracija vodika v obstoječa plinovodna omrežja predstavlja kompleksen izziv. Problem, ki ga nameravam raziskati, se nanaša na tehnične, varnostne in ekonomske vidike prehoda na vodik v okviru obstoječih plinovodnih sistemov.

1.2 Namen, cilji in osnovne trditve

Namen diplomskega dela je raziskati potencial vodika kot alternativnega energenta ter preučiti tehnične, ekonomske in varnostne izzive, povezane z njegovo integracijo v obstoječa plinovodna omrežja. Konkretni cilji so usmerjeni v analizo vpliva vodika na zmanjšanje emisij

toplogrednih plinov, oceno trenutnega stanja plinovodnih omrežij glede na pripravljenost na prehod na vodik, identifikacijo potrebnih tehničnih in infrastrukturnih sprememb ter pregled ekonomskih vidikov prehoda.

V raziskavi bom preverjal naslednje hipoteze:

- H1 – Prehod na vodik kot alternativni vir energije bo bistveno prispeval k zmanjšanju emisij toplogrednih plinov do 80 % in izboljšanju kakovosti zraka v urbanem okolju do 30 %.
- H2 – Trenutna infrastruktura plinovodov ni popolnoma pripravljena za prehod na vodik brez obsežnih tehničnih nadgradenj in prilagoditev kompresorskih in regulacijskih postaj.
- H3 – Vključitev vodika v obstoječe plinovodne sisteme zahteva razvoj novih tehničnih smernic, ki bodo zagotavljale varnost in učinkovitost omrežja, pri čemer je potrebno razviti smernice na področju materialov, tlačne opreme, zaznavanja uhajanja, zaščite pred korozijo in transportnih postopkov.
- H4 – Dolgoročna trajnost prehoda na vodik bo odvisna od ekonomske izvedljivosti, politične podpore in družbene sprejemljivosti tehnologije.

1.3 Predpostavke in omejitve

Pri pisanju diplomskega dela se bom soočil z določenimi predpostavkami in omejitvami. Glede na to, da je prehod energetskega sistema na vodik še v začetni fazi, predvidevam, da so obstoječe raziskave in študije na voljo v omejenem obsegu. Lahko se pojavijo omejitve, kot so dostopnost podatkov, ki so lahko poslovna skrivnost organizacij, in pomanjkanje literature na specifičnih področjih uporabe vodika v plinovodnih sistemih. Prav tako obstaja tveganje, da ne bodo vse potrebne informacije na voljo za celotno časovno obdobje, kar bi lahko vplivalo na celovitost raziskave. Poleg tega bi lahko majhen vzorec razpoložljivih podatkov vplival na zanesljivost zaključkov.

1.4 Uporabljene raziskovalne metode

V diplomski nalogi bom uporabil kombinacijo raziskovalnih metod za celovito analizo obstoječih plinovodnih omrežij in njihove prilagoditve za prenos vodika. Metoda deskripcije bo služila za opis ključnih pojmov, tehničnih značilnosti plinovodov in vpliva vodika na infrastrukturne komponente. S tem bom zagotovil jasen pregled obravnavane problematike. Za vključevanje in analizo strokovnih virov ter tehničnih standardov bom uporabil metodo kompilacije, ki omogoča povzemanje, citiranje in uporabo ugotovitev drugih avtorjev. Na podlagi splošnih spoznanj bom z metodo dedukcije sklepal o vplivih vodika in opisal ustrezne ukrepe za izboljšave. Metoda sinteze bo omogočila združitev vseh ugotovitev in podatkov v zaključke, ki bodo osvetlili izvedljivost in trajnost prehoda na vodik.

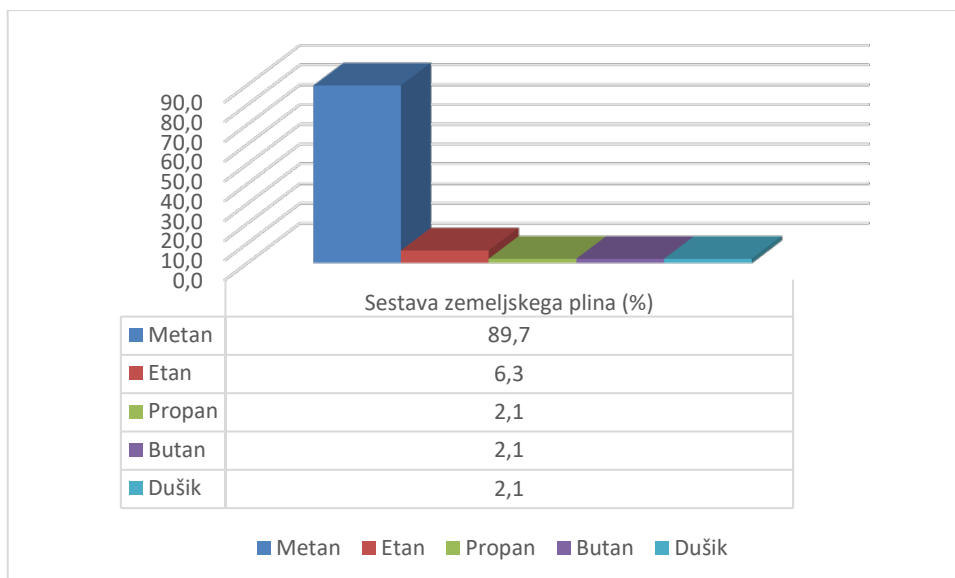
2 ZEMELJSKI PLIN IN VODIK KOT ENERGENTA

2.1 Zemeljski plin (ZP)

ZP je eden najpomembnejših fosilnih virov energije, saj se široko uporablja v industriji, pri proizvodnji električne energije in za ogrevanje. Gre za naravni plin, ki se nahaja v globokih geoloških nepropustnih plasteh pod površjem Zemlje. Pridobiva se z vrtanjem v globoke podzemne rezerve, kjer je mešanica ogljikovodikov ujeta v poroznih kamninah. Po črpanju se plin prečisti, da se odstranijo nečistoče, nato pa se prenese v plinasti obliki preko plinovodov ali kot utekočinjen plin s posebnimi ladjami, namenjenimi za prevoz LNG do uporabnikov za nadaljnjo uporabo.

2.1.1 Lastnosti in sestava zemeljskega plina

ZP je naravni vir energije, ki ga do približno 99 % sestavlja metan, preostali delež pa vključuje manjše količine drugih ogljikovodikov, kot so etan, propan, butan ter drugi plini, kot so ogljikov dioksid, dušik in vodna para. Njegova kemična sestava je eden od ključnih dejavnikov, ki prispeva k njegovi energetski učinkovitosti in sorazmerno čistemu zgorevanju v primerjavi z drugimi fosilnimi gorivi, kot sta premog in nafta. ZP je brez barve in vonja. Ker je vnetljiv in eksploziven, se mu iz varnostnih razlogov dodaja odorant – to so spojine z močnim specifičnim vonjem, ki omogočajo zgodnje zaznavanje morebitnega uhajanja, še preden doseže spodnjo mejo eksplozivnosti. Količine ZP običajno merimo v standardnih kubičnih metrih, kar pomeni prostornino plina pri tlaku 1013,25 mbar in temperaturi 15 °C. Njegova gostota znaša približno 0,68 kg/Sm³, kar je manj kot gostota zraka (1,293 kg/Sm³), zato se ZP ob uhajanju hitro dviga. Gorljiv je pri temperaturi med 595 in 630 °C, medtem ko ima vrelišče pri –161 °C in zmrzne pri –182 °C. ZP, ki se uporablja v Sloveniji, ima kurilnost pri približno 34,1 MJ/Sm³ in gori z značilnim modrim plamenom. Pri zgorevanju se sprošča toplota, nastajata pa ogljikov dioksid in vodna para. V mešanici z zrakom postane eksploziven, če je njegova koncentracija med 4,4 in 16,4 vol %, pri čemer je največja nevarnost eksplozije pri koncentracijah bližje spodnji eksplozivni meji. Poleg tega ima ZP visoko energijsko gostoto, kar pomeni, da lahko z zgorevanjem majhnih količin proizvede veliko količino energije (Plinovodi, 2024).



Graf 1: Sestava zmesi v ZP plinovodov Plinarne Maribor

Vir: (Plinarna Maribor, 2021)

2.1.2 Uporaba zemeljskega plina v energetske sektorju

Zaradi svojega relativno čistega zgorevanja je ZP bolj priljubljen vir energije kot premog in nafta ter se uporablja v državah po vsem svetu.

- **Industrijska uporaba:** ZP je pomemben v industriji, kjer se uporablja kot gorivo za proizvodnjo toplote v številnih procesih, kot sta taljenje kovin ter proizvodnja stekla in keramike. Poleg tega je ključna surovina za proizvodnjo kemikalij, kot sta metanol in amonijak.
- **Proizvodnja električne energije:** ZP se pogosto uporablja v plinskih elektrarnah, kjer produkti zgorevanja poganjajo turbine za proizvodnjo elektrike. Plinske elektrarne uporabljajo bodisi konvencionalne plinske turbine ali kombinirane plinske cikle, kjer toplota, ki nastaja pri zgorevanju, poganja parno turbino za dodatno proizvodnjo energije. Ta proces je energetsko učinkovit in sprošča manj emisij ogljikovega dioksida kot premogovne elektrarne.
- **Ogrevanje:** V gospodinjstvih se ZP uporablja kot energent za ogrevanje zgradb, pripravo potrošne sanitarne vode in kuhanje. V številnih državah je ZP primarni vir energije za ogrevanje zaradi dostopnosti in nižjih stroškov v primerjavi z električno energijo.

- **Transport:** V zadnjih letih se povečuje uporaba ZP v transportu, kjer se uporablja kot stisnjeni zemeljski plin (CNG) ali utekočinjen zemeljski plin (LNG). ZP v teh oblikah je alternativa bencinu in dizelskemu gorivu, zlasti za težka gospodarska vozila, in ima nižje emisije škodljivih plinov.

Zaradi teh različnih uporab je ZP postal ključen del energetskega sektorja, zlasti v državah, ki si prizadevajo za prehod na manj emisijsko intenzivne vire energije.

2.1.3 Okoljski vpliv zemeljskega plina

ZP je pogosto predstavljen kot najčistejši fosilni vir energije zaradi nižjih emisij ogljikovega dioksida v primerjavi s premogom in kurilnim oljem. Pri zgorevanju ZP nastaja bistveno manj emisij ogljikovega dioksida na enoto proizvedene energije kot pri zgorevanju premoga, kar prispeva k manjšemu ogljičnemu odtisu. Poleg tega ZP sprošča manjše količine delcev in drugih onesnaževal, kot so žveplov dioksid in dušikovi oksidi, kar vodi do boljše kakovosti zraka, zlasti na urbanih območjih.

ZP, ki je v večini sestavljen iz metana, pomembno vpliva na podnebje zaradi uhajanja metana med proizvodnjo, prenosom in uporabo. Čeprav metan ostane v ozračju krajši čas kot ogljikov dioksid, ima veliko večjo sposobnost zadrževanja toplote, in sicer kar 25-krat večjo v 100-letnem časovnem obdobju in celo do 86-krat večjo v krajšem 20-letnem časovnem obdobju. Zato je uhajanje metana iz plinovodov in plinske infrastrukture še posebej problematično za podnebne spremembe, saj povečuje toplogredni učinek.

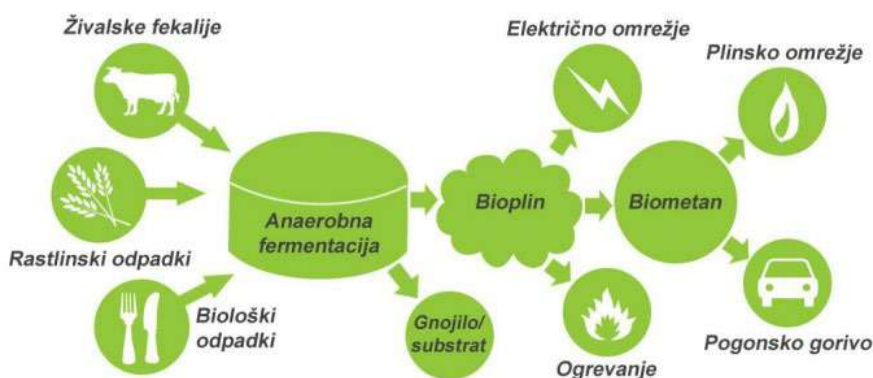
Metan uhaja iz različnih delov infrastrukture oskrbe ZP, vključno s plinovodi in kompresorskimi postajami, kar močno prispeva k segrevanju ozračja. Čeprav so možne tehnične rešitve za zmanjšanje teh uhajanj, so te pogosto kompleksne in drage, kar predstavlja oviro za hitro izboljšanje trenutne situacije. Plinska infrastruktura prispeva k emisijam, ki so pogosto slabo nadzorovane, zaradi česar so potrebni natančnejši načini za odkrivanje in zmanjševanje uhajanja. Raziskave v zvezi s politiko zmanjšanja emisij metana so pokazale, da bi zmanjšanje emisij iz sektorja ZP lahko pomembno kratkoročno vplivalo na upočasnitev globalnega segrevanja. V zadnjem času so bili uvedeni ukrepi za zmanjšanje uhajanja metana, vendar so za trajnostno zmanjšanje emisij potrebni večji politični in tehnološki napor (Tehnološki inštitut Massachusettsa, 2019).

2.1.4 Alternative zemeljskemu plinu

Zraven fosilnega ZP se v energetske sektorju vse bolj raziskujejo in tudi že uporabljajo alternative, ki lahko zmanjšajo ogljični odtis in izkoristijo obstoječo plinovodno infrastrukturo. Med glavnimi alternativami so biometan, sintetični metan in vodik.

➤ Biometan

Biometan je prečiščena oblika bioplina, pridobljenega z anaerobno razgradnjo organskih odpadkov, živalskega gnoja in odpadnih voda, ki lahko nadomesti ZP. Med postopkom čiščenja se odstranijo voda, ogljikov dioksid in druge nečistoče, kar omogoča pridobitev visokokaloričnega plina, primerne za širok spekter uporabe. Njegova uporaba zajema ogrevanje, hlajenje in prenos, kjer se lahko uporablja v stisnjeni ali utekočinjeni obliki. Zaradi svojega obnovljivega izvora in prispevka k zmanjšanju emisij toplogrednih plinov je še posebej pomemben v prometu, zlasti za težka tovorna vozila in ladijski transport, kjer je elektrifikacija manj izvedljiva. Prednost biometana je njegova združljivost z obstoječo plinsko infrastrukturo, kar omogoča hitrejšo implementacijo, brez potrebe po večjih naložbah. Poleg tega njegova možnost skladiščenja in stalne proizvodnje pomaga pri stabilizaciji oskrbe z energijo iz spremenljivih obnovljivih virov, kot sta sončna in vetrna energija. Kljub prednostim biometana njegova razpoložljivost ostaja omejena, saj trenutna proizvodnja ne more zadostiti trenutnim potrebam. Zato ima predvsem dopolnilno vlogo pri razogljičenju sektorjev, kjer druge rešitve niso izvedljive (Pannonia BioGas, 2025).

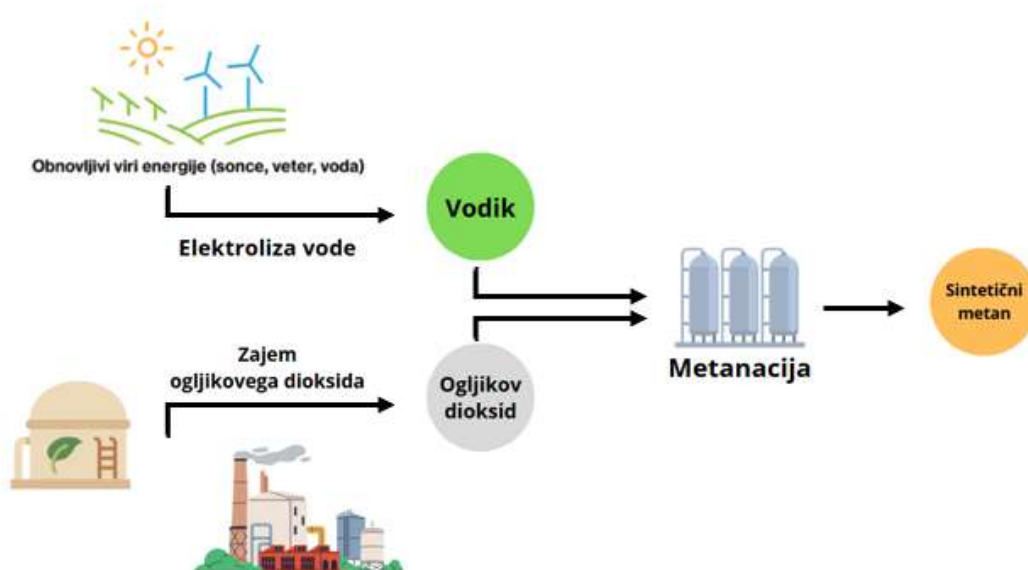


Slika 1: Nastanek in uporaba biometana

Vir: (Bavdaž, 2018)

➤ Sintetični metan

Sintetični metan je plin, pridobljen s postopkom metanacije s kemijsko reakcijo med vodikom in ogljikovim dioksidom. Vodik je običajno proizveden z elektrolizo vode, pri čemer se uporabljajo OVE, ogljikov dioksid pa lahko izhaja iz zajema emisij ali bioloških virov, kar pomaga zmanjšati emisije toplogrednih plinov. Prav tako je sintetični metan mogoče vbrizgavati v obstoječe plinovodno omrežje. Proizvodni postopek je energetsko zahteven in trenutno še precej drag, vendar naj bi se stroški v prihodnosti z razvojem tehnologije znižali.



Slika 2: Postopek metanacije

Vir: lasten vir

➤ Vodik

Poleg biometana in sintetičnega metana se kot alternativa ZP vse bolj uveljavlja tudi vodik. Vodik se lahko uporablja za ogrevanje, hlajenje in transport, pri čemer je njegova prednost v tem, da pri uporabi ne proizvaja emisij ogljikovega dioksida, saj je edini stranski produkt voda. V kombinaciji z biometanom in sintetičnim metanom lahko vodik bistveno prispeva k trajnostnemu energetskemu sistemu. Kljub trenutnim izzivom, kot so visoki stroški proizvodnje in potreba po prilagoditvi infrastrukture, se pričakuje, da bo z nadaljnjim razvojem tehnologije vodik postal ključni element v prehodu na nizkoogljico družbo.

2.2 Vodik

Vodik je najpogostejši element v vesolju, na Zemlji pa se v prosti obliki skoraj ne pojavlja, zato ga je treba pridobivati z različnimi postopki, ključna pogoja za smiselno proizvodnjo pa sta brezogljichnost in ekonomska upravičenost. Vodik se uporablja v številnih sektorjih, vključno z industrijo, prometom in energetiko. V industriji je ključnega pomena pri različnih procesih, kot je proizvodnja amonijaka in metanola, jekla ter elektronike, medtem ko se v prometu in energetiki vse bolj uveljavlja za proizvodnjo električne energije v gorivnih celicah.

2.2.1 Lastnosti vodika

Vodik (kemični simbol H) je najlažji in najpreprostejši element v periodnem sistemu. Je brez barve, vonja, okusa, zelo reaktiven pri normalnih pogojih in sestavljen iz dveh vodikovih atomov (H_2). Pri standardnih pogojih (pri temperaturi $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ in tlaku $1013,25\text{ mbar}$) je vodik plin, ki ima zelo nizko gostoto, približno $0,084\text{ kg/m}^3$, kar je približno 14-krat manj od gostote zraka. Vodik postane tekoč pod točko vrelišča pri $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ in zmrzne pod točko tališča pri $-259\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vname se pri zelo visokih temperaturah, okrog $520\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Levovnik, 2010). Kadar gori, ima brezbarven plamen, produkt zgorevanja pa je voda, kar ga uvršča med čiste energente. Vodik ima zelo visoko kurilnost, ki znaša 120 MJ/kg (Laboratorij za regulacijsko tehniko in močnostno elektroniko, 2012/2013). To pomeni, da lahko iz majhne količine vodika pridobimo zelo veliko energije, kar ga dela privlačnega za uporabo v gorivnih celicah in kot alternativno gorivo za vozila. Ker pa ima vodik izjemno nizko gostoto, je kurilna vrednost na enoto prostornine 3–4-krat manjša v primerjavi z ZP, kar predstavlja izziv pri njegovem skladiščenju in prenosu, saj so potrebni ali visok tlak ali nizke temperature za učinkovito skladiščenje. Vodik je zelo eksploziven plin, kar je ena izmed njegovih ključnih lastnosti pri uporabi kot gorivo. Meja eksplozivnosti vodika je dosežena, ko njegova koncentracija v zraku znaša med $4,1\text{ vol } \%$ in $72,5\text{ vol } \%$ (Laboratorij za regulacijsko tehniko in močnostno elektroniko, 2012/2013). To pomeni, da lahko že zelo majhna količina vodika v zraku povzroči eksplozijo ob prisotnosti vira vžiga.

2.2.2 Pridobivanje vodika

Vodik v naravi večinoma ni prost, zato ga je treba pridobivati iz spojin, kot sta voda ali ZP. Glede na način pridobivanja ločimo:

- **Sivi vodik** je najpogostejše proizvedena oblika vodika in se pridobiva s parno reformacijo ZP (SMR). Sivi vodik trenutno predstavlja večino svetovne proizvodnje vodika in je tudi ekonomsko najugodnejši način pridobivanja vodika z vidika stroškov. Pri tem postopku nastaja velika količina emisij ogljikovega dioksida, kar negativno vpliva na okolje.
- **Modri vodik** se prav tako pridobiva s parno reformacijo ZP, vendar z dodatno uporabo tehnologije za zajemanje in shranjevanje ogljikovega dioksida (CCS), ki se kasneje lahko uporabi za izdelavo sintetičnega metana. S tem se zmanjšajo emisije ogljikovega dioksida, ki nastanejo med proizvodnjo, kar izboljša okoljsko učinkovitost te metode, ampak so stroški proizvodnje vodika višji kot pri sivem vodiku.
- **Rjavi vodik**, ki se včasih imenuje tudi črni vodik, se pridobiva iz premoga s postopkom uplinjanja. Glavna slabost rjavega vodika je, da gre za zelo umazan proces z visokimi emisijami ogljikovega dioksida, še višjimi kot pri sivem vodiku. Zaradi velikega okoljskega vpliva ta metoda ni v ospredju prihodnjih energetskega rešitev.
- **Turkizni vodik** nastaja s pirolizo metana, pri kateri se metan razgradi na vodik in trdi ogljik, brez neposrednih emisij ogljikovega dioksida. V prihodnosti bi lahko predstavljal nizkoogljeno alternativo, vendar je njegova okoljska sprejemljivost odvisna od uporabe OVE za termični proces ter trajnega shranjevanja ali koristne uporabe nastalega ogljika. Pridobljeni trdi ogljik se lahko uporabi v kemijski industriji ali varno odloži, kar bi dodatno zmanjšalo vpliv na okolje.
- **Rožnati vodik** se pridobiva z elektrolizo vode, pri čemer se uporablja jedrska energija kot vir električne energije. Glavna prednost rožnatega vodika je, da omogoča stalno in zanesljivo proizvodnjo brez emisij ogljikovega dioksida, saj jedrska energija ni odvisna od vremenskih pogojev, kot so veter ali sončna svetloba. Kljub temu so izzivi, povezani s sprejemanjem jedrske energije, stroški in dolgoročnim ravnanjem z jedrskimi odpadki.
- **Zeleni vodik** se proizvaja z elektrolizo vode, pri čemer se uporablja električna energija iz OVE, kot sta sončna in vetrna energija. Elektrolizatorji s pomočjo elektrokemične reakcije razgradijo vodo na vodik in kisik, pri čemer ne nastajajo emisije ogljikovega dioksida. Kljub okoljskim prednostim zeleni vodik trenutno predstavlja le majhen delež celotne

proizvodnje, saj so stroški proizvodnje še vedno visoki v primerjavi z nekaterimi drugimi metodami, predvsem zaradi cene elektrolizatorjev in razpoložljivosti OVE.



Slika 3: Barve vodikov in njihovo pridobivanje

Vir: Lasten vir

2.2.3 Uporaba vodika v energetske sektorju

- **Industrijski procesi:** Vodik ima ključno vlogo v industriji kot surovina, reducent, zaščitni plin in energent. V kemični industriji je nepogrešljiv pri proizvodnji amonijaka, metanola in gnojil, v petrokemični industriji pa pri hidrokrekingu nafte in odstranjevanju žvepla iz goriv. Uporablja se tudi v prehrabeni industriji za hidrogenacijo maščob ter pri proizvodnji stekla in elektronike kot zaščitni plin. Pri varjenju omogoča učinkovito taljenje kovin, v vesoljskih tehnologijah pa služi kot gorivo za raketne motorje. Zaradi svoje vsestranskosti je vodik ključen v številnih industrijskih procesih in bo s prehodom na vodikovo gospodarstvo še pridobil na pomenu.
- **Proizvodnja električne energije in shranjevanje:** Vodik igra ključno vlogo pri proizvodnji električne energije kot shranjevalec presežkov iz OVE. Ko je proizvodnja sončnih in vetrnih elektrarn višja od trenutnega povpraševanja, se lahko presežek elektrike

uporabi za elektrolizo vode, pri čemer nastane vodik. Ta se nato shrani in pretvori nazaj v električno energijo s pomočjo gorivnih celic ali zgorevanja v plinskih elektrarnah, kadar je potreba po energiji večja ali ko OVE niso na voljo. Vodik tako omogoča stabilizacijo elektroenergetskega omrežja in služi kot brezogljčni energent, ki podpira prehod na trajnostni energetski sistem z zmanjšanimi emisijami ogljikovega dioksida.

- **Prometni sektor:** Vodik ima velik potencial v prometnem sektorju kot čisto gorivo, saj omogoča brezogljčno mobilnost. Uporablja se v gorivnih celicah, kjer kemična reakcija s kisikom omogoča proizvodnjo elektrike za pogon vozil (avtomobili, avtobusi, tovornjaki, vlaki, ladje). Poleg tega lahko vodik kot sintetično gorivo nadomesti fosilna goriva v letalskem in pomorskem prometu, kjer je elektrifikacija otežena. Z razvojem infrastrukture lahko vodik bistveno prispeva k razogljičenju prometa in zmanjšanju emisij toplogrednih plinov.

2.2.4 Okoljski vpliv vodika in prispevek k zmanjšanju emisij

Vodik ni neposredno toplogredni plin, ima pa indirektni vpliv na segrevanje ozračja. Njegova prisotnost v ozračju lahko vpliva na kemijske procese, katerih produkti pa vplivajo na dvig temperature ozračja.

Molekule vodika lahko uhajajo iz plinovodov in skladiščne infrastrukture v celotnem procesu proizvodnje in prenosa v vodikovem energetskem sistemu. Ko vodik uhaja iz sistemov pod zemljo, se večina absorbira v tleh, vendar približno četrtina konča v atmosferi. Vpliv uhajanja vodika na povprečno globalno zvišanje temperature je močno odvisen od upoštevanega časovnega obdobja. Za okvirno kvantifikacijo tega vpliva se lahko uporabi merilo potencialnega globalnega segrevanja (GWP) za obdobje 20 ali 100 let. Vrednost GWP za toplogredni plin izraža vpliv sprostitve ene tone plina v atmosfero v primerjavi z ogrevanjem, ki bi ga povzročila ena tona ogljikovega dioksida v istem časovnem obdobju.

Nedavna študija, objavljena v reviji *Atmospheric Environment* (Derwent et al., 2020), ocenjuje, da ima vodik potencial globalnega segrevanja (GWP) približno 33-krat večji od ogljikovega dioksida v 20-letnem obdobju. Druga raziskava, predstavljena v *Geophysical Research Letters* (Paulot et al., 2021), potrjuje te ugotovitve in poudarja kratkoročne vplive vodika na segrevanje ozračja. Poleg tega študija Warwicka in sodelavcev (2022) ter raziskava Ocka in Hamburga (2022) nakazujeta, da bi lahko bil GWP vodika v zelo kratkih časovnih obdobjih (1–3 leta) še

višji, z vrednostmi nad 100. Kljub temu so te ocene nove in nekoliko negotove, zato se za izračune pogosto uporablja vrednost GWP-20.

Toplogredni plin		GWP-20	GWP-100
Warwick in sod., 2022	Vodik (H ₂)	33 (20 - 44)	11 (6 - 16)
Ocko & Hamburg, 2022		38 (na podlagi Paulota in sod., 2021)	10 (na podlagi Paulota in sod., 2021)
		19 (na podlagi Derwenta in sod., 2020)	5 (na podlagi Derwenta in sod., 2020)
Field & Derwent, 2021		-	3,3 (1,9 - 4,7)
IPCC AR6 (Masson-Delmotte in sod., 2021)	Metan (CH ₄)	81 - 83	27 - 30
	Dušikov dioksid (NO ₂)	273	273
	Ogljikov dioksid (CO ₂)	1	1

Tabela 1: Vrednosti potenciala globalnega segrevanja (GWP) za obdobje 20 in 100 let za različne toplogredne pline. Ker GWP meri vpliv segrevanja emisij ene tone plina v primerjavi z eno tono ogljikovega dioksida, so vrednosti za ogljikov dioksid (CO_2) vedno enake 1.

Vir: (Commission, 2023)

Vodik je kot najmanjša in najlažja molekula zaradi svoje narave nagnjena k uhajanju iz infrastrukture za proizvodnjo, prenos in skladiščenje. V primerjavi z metanom so trenutne ocene skupnih stopenj uhajanja metana v ozračje v razvitih državah približno 1–2 %, pri čemer je glavnina (več kot 75 %) uhajanja povezana s proizvodnjo in uporabo metana. Glede na podobnosti v infrastrukturi in postopkih je verjetno, da bi stopnje uhajanja vodika lahko bile v podobnem razponu, čeprav je zaradi manjše velikosti molekule vodika možnost uhajanja večja, zlasti če infrastruktura ni ustrezno prilagojena.

Za oceno vpliva uhajanja vodika na okolje se uporablja koncept potenciala globalnega segrevanja (GWP). Vrednost GWP-20 za vodik je ocenjena na 33, kar pomeni, da ima ena tona vodika v 20-letnem obdobju 33-krat večji vpliv na segrevanje ozračja kot ena tona ogljikovega dioksida. Pri stopnji uhajanja 1 % bi to pomenilo ogljično intenzivnost približno 10 gCO₂/kWh_e za vodik. Za primerjavo, enaka stopnja uhajanja metana bi povzročila ogljično intenzivnost okoli 60 gCO₂/kWh_e, ki bi se povečala na 260 gCO₂/kWh_e ob upoštevanju emisij ogljikovega dioksida pri zgorevanju metana. To kaže, da bi moral vodik v primerjavi z metanom uhajati s stopnjo približno 25 %, da bi dosegel enak vpliv na radiacijsko prisilo kot 1 % uhajanja metana, kar je malo verjetno.

Glede na poročilo Energy Transitions Commission bi lahko uporaba vodika do leta 2050 dosegla 800 milijonov ton letno, kar bi predstavljalo približno 15 % končne porabe energije.

Ob predpostavki 2-odstotne stopnje uhajanja in GWP-20 vrednosti 33 bi to pomenilo približno 530 milijonov ton ekvivalentnih emisij ogljikovega dioksida letno zaradi uhajanja vodika. Za primerjavo, trenutne emisije iz uhajanja metana v energetske sektorju povzročijo približno 3.700 milijonov ton ekvivalentnih emisij ogljikovega dioksida letno, kar pomeni, da bi prehod na vodik zmanjšal emisije za 85,7 %.

Čeprav bi uhajanje vodika prispevalo k segrevanju ozračja, so realne stopnje uhajanja (2 % ali manj) relativno majhne v primerjavi z vplivom trenutnih emisij metana. Kljub temu je ključnega pomena, da se z naraščajočo proizvodnjo in distribucijo vodika vzpostavijo učinkoviti sistemi za nadzor in ocenjevanje uhajanja ter certifikacijski postopki za nizkoogljični vodik, da se zagotovijo okoljske koristi njegove uporabe.

Vir: (Commission, 2023)

3 PREGLED OBSTOJEČEGA STANJA PLINOVODNIH OMREŽIJ IN NJIHOVE PRIPRAVLJENOSTI NA PREHOD NA VODIK

Prehod na vodik kot energetski vir prihodnosti predstavlja velik izziv za obstoječa plinovodna omrežja, ki so bila primarno zgrajena za prenos ZP. Glavni izzivi so povezani z razlikami v fizikalnih lastnostih med vodikom in ZP, saj ima vodik manjšo molekulsko maso in višjo difuzivnost, kar lahko vpliva na obstojnost materialov, kot sta jeklo in polietilen visoke gostote (PE-HD), ki se uporabljata kot gradnika v plinovodnih omrežjih.

3.1 Tehnične značilnosti obstoječih plinovodov

Plinovodni sistemi, ki se danes uporabljajo za prenos ZP, temeljijo na dolgoletnih inženirskih izkušnjah ter upoštevajo visoke standarde glede varnosti in učinkovitosti. Ključna materiala teh sistemov sta jeklo in PE. Njihove lastnosti, kot so odpornost na tlak, korozijo in temperaturne spremembe, so bile prilagojene specifičnim zahtevam ZP.

Pomembno je razlikovati med **prenosnimi in distribucijskimi plinovodi**, saj imata ti dve vrsti plinovodov drugačne funkcije, konstrukcijske značilnosti in tehnične zahteve.

- **Prenosni plinovodi** so zasnovani za prenos velikih količin plina na dolge razdalje, pogosto med državami ali regijami. Izdelani so večinoma iz visoko kakovostnega jekla, saj morajo vzdržati visoke delovne tlake, ki lahko dosežejo tudi do 100 barov ali več. Zaradi visokih tlakov so prenosni plinovodi običajno večjega premera (od 200 mm do več kot 1500 mm) in vključujejo zaščito proti koroziji, kot so zaščitni premazi in katodna zaščita. Prenosni plinovodni sistemi vključujejo tudi kompresorske postaje, ki zagotavljajo stalni tlak in omogočajo prenos plina na dolge razdalje.
- **Distribucijski plinovodi** so namenjeni oskrbi s plinom končnim uporabnikom, kot je industrija in gospodinjstvo. Distribucijski plinovodi so običajno zgrajeni iz PE, ki je bolj prilagodljiv in enostaven za montažo, hkrati pa zadostuje za nižje delovne tlake (običajno do 4bar). Ti plinovodi so manjšega premera (od 32 mm do približno 315 mm) in se uporabljajo za lokalno distribucijo.

Med prenosnimi in distribucijskimi plinovodi so ključne razlike tudi v tehnični zasnovi in dodatni opreми. Prenosni plinovodi zahtevajo napredne sisteme za nadzor tlaka, zaščito pred

uhajanjem in obsežno omrežje kompresorskih postaj, medtem ko distribucijski plinovodi vključujejo merilno regulacijske postaje (MRP), ki zmanjšujejo tlak, primeren za uporabo pri končnih odjemalcih.

3.2 Materiali in konstrukcija plinovodov

Plinovodno omrežje je sestavljeno iz več komponent, ki skupaj zagotavljajo varen in učinkovit prenos zemeljskega plina do končnih uporabnikov. Med glavnimi sestavnimi deli so:

➤ CEVI

Jeklene cevi



Slika 4: Jeklene cevi

Vir: (Steel pipe China, 2024)

V prenosnih plinovodih se uporabljajo cevi iz nelegiranega ali malo legiranega ogljikovega jekla, skladno s standardom SIST EN 1594, ki določa funkcionalne zahteve za plinovodne sisteme z najvišjim delovnim tlakom nad 16 barov. Te cevi so običajno zvarjene ali spojene s prirobnicami. Standard se nanaša na kopenske visokotlačne jeklene plinovodne infrastrukture, namenjene prenosu nestrupenega in nekorozivnega zemeljskega plina, biometana, vodika ter njihovih mešanic pod pogojem, da delovni pogoji in lastnosti plina ne vplivajo na varno delovanje cevovodnega sistema.

Za distribucijska omrežja z najvišjim delovnim tlakom do vključno 16 barov se uporabljajo cevi, skladne s standardom SIST EN 12007-3, ki določa posebne funkcionalne zahteve za

jeklene plinovode. Ta standard dopolnjuje splošne funkcionalne zahteve, opredeljene v SIST EN 12007-1, in poudarja posebne vidike, povezane z uporabo jeklenih cevi, kot so izbira materiala, konstrukcija, vgradnja, preskušanje in vzdrževanje, da se zagotovi varno in učinkovito delovanje plinovodnega sistema.

PE cevi



Slika 5: Različne dimenzije polietilenske cevi (PE-HD)

Vir: (Haili Pipe, 2022)

V distribucijskih plinovodnih omrežjih se najpogosteje uporabljajo cevi iz polietilena visoke gostote (PE-HD) zaradi njihove odpornosti proti koroziji, fleksibilnosti in dolge dobe uporabnosti. Ker PE-HD ni podvržen koroziji, za razliko od jekla ne potrebuje dodatne protikorozijske zaščite, kar prispeva k enostavnejšemu vzdrževanju in nižjim stroškom skozi celotno dobo uporabnosti. Standard SIST EN 12007-2 določa posebne funkcionalne zahteve za PE plinovode z najvišjim delovnim tlakom do vključno 10 barov, kar vključuje tudi PE-HD cevi. Ta standard dopolnjuje splošne zahteve iz SIST EN 12007-1 in se osredotoča na vidike, kot so izbira materiala, konstrukcija, vgradnja, preskušanje in vzdrževanje, da se zagotovi varno in učinkovito delovanje plinovodnega sistema. Poleg tega se SIST EN 12007-2 navezuje na standard SIST EN 1555, ki podrobneje obravnava specifikacije za materiale, dimenzije, zahteve glede delovanja in preskusne metode za PE cevi, fitinge in ventile, namenjene za oskrbo s plinastimi gorivi. Skupaj ti standardi zagotavljajo celovit okvir za uporabo PE-HD cevi v distribucijskih plinovodnih omrežjih, kar prispeva k varnosti in zanesljivosti oskrbe s plinom.

➤ **ZAPORNI ELEMENTI**

Zaporni elementi vključujejo različne zaporne mehanizme za varno upravljanje plinovodnega omrežja. Nameščeni so na ključnih točkah omrežja in omogočajo popolno zaprtje pretoka plina v primeru vzdrževanja, popravila ali izrednih dogodkov in so zasnovani tako, da zagotavljajo visoko stopnjo tesnjenja.

Krogelne pipe



Slika 6: Krogelna pipa jeklo – polietilen podzemna za distribucijski plinovod

Vir: (Polix, 2024)

Krogelne podzemne pipe so idealne za visokotlačne plinovode, saj zagotavljajo visoko zanesljivost tesnjenja in zapirajo pretok plina, kar je ključno za varnost. Krogelne pipe omogočajo hitro odpiranje in zapiranje s četrto obrata, kar je koristno v situacijah, kjer sta potrebna hitra regulacija ali zapiranje pretoka, kot so izredne razmere ali nujna vzdrževalna dela. Zraven tega so krogelne pipe zasnovane tako, da ustvarjajo minimalno pretočno oviro, kar omogoča skoraj nemoten pretok in zmanjšuje izgube tlaka v omrežju. Krogelna pipa deluje na osnovi krogle z izvrtino, ki se vrti znotraj ohišja pipe. Ko je izvrtina usmerjena v smeri pretoka (odprta pozicija), plin teče skozi brez večjih ovir. Če pa je izvrtina pravokotno na pretok (zaprta pozicija), krogelna pipa popolnoma prekine tok plina. Krogelna pipa ustvarja zelo malo pretočnega upora, zato je primerna za sisteme, kjer je treba zmanjšati izgube tlaka in zagotoviti nemoten pretok.

Zasuni



Slika 7: Zasun jeklo – polietilen za distribucijski plinovod

Vir: (Hawle, 2024)

Zasuni se pogosto uporabljajo v sistemih, kjer ni potrebe po visoki stopnji tesnjenja, saj delujejo zanesljivo pri nižjih tlakih. Čeprav zahtevajo več prostora in časa za popolno aktiviranje kot krogelne pipe, omogočajo enostavno ročno upravljanje. Zasun deluje na principu navpičnega zapornega elementa (lopute), ki se premika navzgor in navzdol v vodilu znotraj ohišja zasuna. Ko je loputa popolnoma dvignjena, zasun omogoča neoviran pretok plina, saj popolnoma sprosti pretočno pot. Ko je loputa spuščena, popolnoma zapre pretok plina.

➤ SPOJI

Spajanje jeklenih cevi

Varjenje jeklenih cevi v prenosnih in distribucijskih plinovodih mora zagotavljati visoko strukturno trdnost in neprepustnost spojev. Ključni standard, ki ureja varjenje jeklenih plinovodov, je SIST EN 12732, ki določa postopke varjenja, kvalifikacijo varilcev ter neporušitvene preiskave zvarov. Pri prenosnih plinovodih se uporablja tudi SIST EN ISO 3183, ki določa zahteve za jeklene cevi v cevovodnih sistemih. Za zagotavljanje varnosti in kakovosti morajo biti zvari podvrženi strogemu nadzoru z neporušitvenimi preiskavami, kot je radiografsko (RT) ali ultrazvočno (UT) testiranje, ki omogočata zaznavanje morebitnih napak v strukturi varov.

Spojanje PE cevi



Slika 8: Različni tipi fazonskih kosov

Vir: (Cimmex, 2023)

Spoji na PE ceveh v plinovodnih sistemih morajo zagotavljati visoko stopnjo tesnjenja in mehanske trdnosti. Spajanje se izvaja na dva glavna načina: čelno varjenje, ki se uporablja redkeje, in elektrofuzijsko varjenje, skladno s standardoma EN 12007-2 in DVGW G 472. Pri čelnem varjenju se konca cevi segrejeta in pod pritiskom združita, medtem ko pri elektrofuzijskem varjenju fittingi z vgrajenimi grelnimi žicami segrejejo in pretopijo steno cevi s fittingom, kar omogoča homogeno spojitev materiala. Kakovost spojev se preverja z neporušitvenimi preiskavami, kot jih določa DVGW G 469, pri čemer se uporabljata vizualni pregled in tlačni preizkus za zaznavanje morebitnih napak.

➤ **ZAŠČITA JEKLENIH PLINOVODOV**

Za zaščito jeklenih plinovodov pred korozijo se uporabljata aktivna katodna zaščita in pasivna antikorozijska zaščita, pri čemer veljajo različni standardi za prenosne in distribucijske plinovode.

Pri prenosnih plinovodih se uporablja standard SIST EN 1594, ki določa zahteve za projektiranje, obratovanje in zaščito cevovodov. Protikorozijska zaščita se izvaja z aktivno katodno zaščito, ki deluje po principu vsiljenega toka. Usmerniška naprava ustvarja električni potencial, ki preprečuje korozijo, pri čemer so plinovodi povezani z anodnim ležiščem. Nadzoruje se prek merilnih mest, kjer se spremlja električni potencial plinovoda. V distribucijskih plinovodih zaščita jeklenih cevi temelji na standardu SIST EN 12007-3 vključno s SIST EN 12068, ki vključuje tako aktivno katodno zaščito kot pasivno protikorozijsko zaščito.

Aktivna katodna zaščita deluje na enak način kot pri prenosnih plinovodih in se uporablja pri jeklenih cevovodih, ki so vkopani v zemljo. Pasivna protikorozijska zaščita vključuje tovarniško izolirane jeklene cevi v skladu z DIN 30670, spoji in fazonski kosi pa se dodatno zaščitijo z namenskim izolacijskim trakom ali toplotno krčljivimi materiali. Po končani izolaciji se opravi preizkus kakovosti izolacije z detektorjem prebojnosti. Nadzemni deli plinovodov so zaščiteni s premazi v skladu s standardom SIST EN ISO 12944, ki določa postopke barvanja za dolgotrajno korozijsko odpornost.

➤ **MERILNO REGULACIJSKE POSTAJE (MRP)**

MRP so ključne točke v plinovodnem sistemu, kjer se izvajata dva procesa: regulacija tlaka in merjenje pretoka plina. Te postaje omogočajo prilagajanje tlaka na želeni nivo pred distribucijo plina do končnih uporabnikov in zagotavljajo natančne podatke o pretoku, ki so potrebni za upravljanje sistema ter obračun porabe plina.

Glavne komponente MRP so:

- **Zaporne armature** – vključujejo več ventilov, med katerimi sta tudi vhodni in izhodni ventil, nameščena na točki vstopa in izstopa plina iz postaje. Običajno so to krogelne pipe, ki omogočajo hitro in zanesljivo zapiranje ter odpiranje pretoka plina skozi sistem.
- **Filtri** – odstranjujejo delce in nečistoče iz plina, s čimer zagotavljajo čistejši plin in varno delovanje ostale opreme.
- **Grelniki** – segrejejo plin na ustrezno temperaturo, saj znižanje tlaka plina povzroči ohlajanje plina.
- **Regulacijska oprema** – omogoča nastavljanje in vzdrževanje želenega tlaka v omrežju. Ob okvari regulatorja se aktivira varnostna oprema, ki poskrbi za ustrezno zapiranje MRP.
- **Merilna oprema** – meri količino pretečenega plina.
- **Odorirne naprave** – dodajajo odorirno sredstvo ZP, saj je ta naravno brez vonja. S tem se doseže, da ZP dobi značilen in prepoznaven vonj.
- **Jeklene cevi** – tvorijo osnovno cevno strukturo postaje, omogočajo povezavo med komponentami ter zagotavljajo odpornost na visok tlak in mehanske obremenitve sistema. Na njihove konce so zvarjene prirobnice, ki omogočajo razstavljivo povezavo s komponentami, kot so ventili, filtri in plinomeri. S tem so omogočeni lažje sestavljanje, vzdrževanje in morebitna zamenjava posameznih elementov v postaji.

Ta kombinacija elementov omogoča MRP nadzorovan, varen in zanesljiv prenos plina skozi celoten sistem (Uranjek, 2016).

V distribucijskih sistemih se poleg MRP uporabljajo tudi samostojne merilne postaje (MP), ki so namenjene zgolj merjenju pretoka plina in regulacijske postaje (RP), katerih naloga je izključno uravnavanje tlaka. Ti dve postaji opravljata enake funkcije kot v primeru, ko sta združeni v MRP, le da delujeta ločeno.

Za zagotavljanje varnega in učinkovitega delovanja MRP veljajo tehnične zahteve, določene v standardih, kot sta SIST EN 12186 in SIST EN 12279, ki opredeljujeta delovanje, varnostne zahteve in ključne funkcije merilnih ter regulacijskih postaj.

➤ **KOMPRESORSKE POSTAJE**

Kompresorske postaje so ključni del prenosnega plinovodnega sistema, saj omogočajo vzdrževanje tlaka in pretoka plina na daljših razdaljah. Med prenosom skozi plinovode tlak postopoma upada zaradi trenja plina ob stenah cevi, lokih in zapornih elementih, zato kompresorji v postajah tlak ponovno dvignejo ter zagotavljajo nemoten tok plina skozi omrežje. Glede na delovanje se uporabljajo centrifugalni kompresorji, ki so primerni za velike pretoke in so najpogostejše v uporabi v prenosnih plinovodih, batni kompresorji za nižje pretoke in višje tlake ter vijačni kompresorji, ki se uporabljajo v manjših plinovodnih sistemih.

Kompresorske postaje so sestavljene iz:

- **Kompresorja** oziroma glavne komponente, ki povečuje tlak plina.
- **Hladilnika plina** – po kompresiji se plin segreje, zato je potrebno njegovo hlajenje, da se preprečijo poškodbe materialov plinovoda.
- **Filtrov**, ki odstranjujejo nečistoče, kot so trdni delci ali vlaga, ki bi lahko poškodovali opremo.
- **Merilnih sistemov**, ki so namenjeni spremljanju tlaka, temperature in pretoka plina.
- **Varnostnih sistemov**, ki vključujejo varnostne ventile, tlačna stikala, detektorje uhajanja plina in druge zaščitne mehanizme, ki preprečujejo okvare in zagotavljajo varno delovanje postaje.

Za pogon kompresorjev se uporabljajo različni viri energije, odvisno od razpoložljivosti in specifičnih potreb omrežja. Plinske turbine pogosto izkoriščajo del plina kot gorivo, kar povečuje energetska učinkovitost. V omrežjih z dostopom do električne energije se uporabljajo elektromotorji, medtem ko dizelski motorji običajno služijo kot rezervni vir v primeru izpadov ali posebnih operativnih zahtev.

Za zagotavljanje varnosti in zanesljivosti kompresorskih postaj veljajo standardi, kot je SIST EN 12583, ki določa funkcionalne zahteve za njihovo načrtovanje, gradnjo in obratovanje, ter SIST EN 12186 in SIST EN 12279, ki pokrivata regulacijske in varnostne zahteve plinskih sistemov. Pri obstoječih postajah se upoštevajo tudi nacionalni predpisi, ki lahko določajo dodatne zahteve.

4 ANALIZA POTREBNIH SPREMEMB ZA IMPLEMENTACIJO VODIKA V OBSTOJEČE OMREŽJE

Vodik ima velik potencial za razogljčenje energetskega sistema, vendar ostaja večinoma neizkoriščen. Trenutno se letno proizvede okoli 75 milijonov ton vodika, pri čemer 95 % izvira iz fosilnih goriv (sivi in modri vodik), kar povzroča velike emisije ogljikovega dioksida – do 9 ton ogljikovega dioksida na tono proizvedenega vodika. OVE, ki bi omogočili trajnostno proizvodnjo, so premalo izkoriščeni. Za preboj zelenega vodika je poleg širjenja OVE nujen razvoj celovite infrastrukture za proizvodnjo, kompresijo, prenos in shranjevanje, da se zagotovi zanesljiva oskrba industrije in drugih potrošnikov.



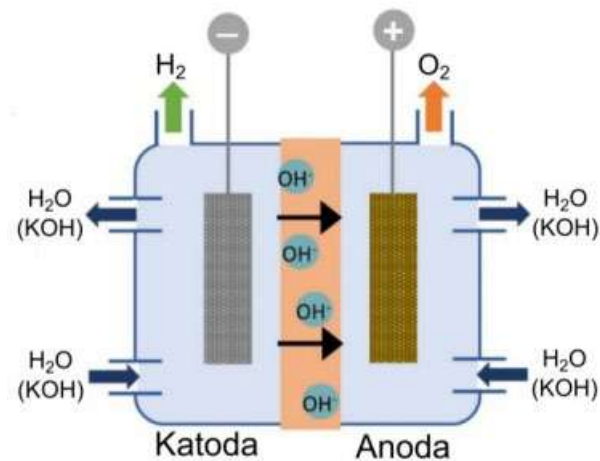
Slika 9: Elektroliza – kompresija – prenos/shranjevanje

Vir: (Nowega GmbH, 2020)

4.1 Proizvodnja zelenega vodika

Proizvodnja zelenega vodika temelji na elektrolizi vode, kjer se uporablja izključno OVE. Pri tem postopku se voda s pomočjo električnega toka razgradi na vodik in kisik. Ta proces je okolju prijazen, saj ne povzroča emisij ogljikovega dioksida, kar ga razlikuje od konvencionalne parne reformacije fosilnih goriv. Za proizvodnjo ene tone zelenega vodika je potrebnih približno 55 MWh električne energije. Danes se za elektrolizo vode uporabljata predvsem dva glavna postopka:

- **Alkalna elektroliza**

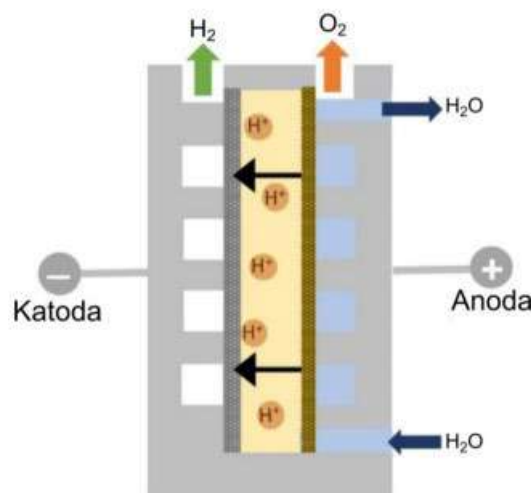


Slika 10: Shema alkalnega elektrolizatorja

Vir: (Novak, 2022)

Alkalni elektrolizator kot elektrolit uporablja vodo z dodatkom kalijevega hidroksida KOH (približno 30 %) ali natrijevega hidroksida NaOH (približno 25 %). V katodnem delu pride do reakcije vode z elektroni, pri čemer nastaneta vodik in hidroksidni ioni (OH^-). Ti ioni prehajajo skozi membrano v anodni del, kjer oddajo elektrone in tvorijo kisik. Glavna slabost alkalnih elektrolitov je njihova korozivnost, kar vpliva na dobo uporabnosti in stroške vzdrževanja.

- **PEM elektroliza:**



Slika 11: Shema PEM elektrolizatorja

Vir: (Novak, 2022)

Slika prikazuje elektrolizo z membrano za prehod protonov (PEM), kjer kot elektrolit služi deionizirana voda. Voda na anodni strani razpade na kisik in vodikove ione (H^+). Ti ioni nato preidejo skozi membrano na katodno stran, kjer sprejmejo elektrone in tvorijo plinasti vodik. Ključno vlogo pri procesu imajo žlahtne kovine (kot so zlato, iridij in platina), ki služijo kot katalizatorji in so zaradi visoke cene glavna omejitev PEM elektrolizatorjev.

4.2 Prenos vodika

Ne glede na način proizvodnje vodika je ključen tudi prenos vodika, kadar ta ni proizveden neposredno na mestu uporabe. S tem namenom so na voljo različni tehnični pristopi:

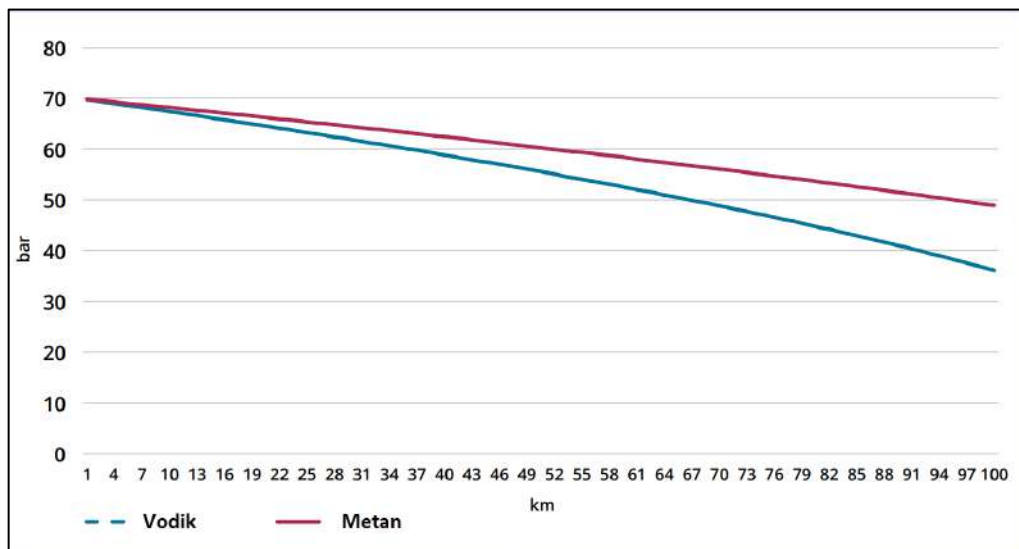
- Komprimiran vodik v visokotlačnih rezervoarjih: vodik se shrani v rezervoarjih pod visokim tlakom.
- Utekočinjen vodik: vodik se utekočini in shrani v termično izoliranih rezervoarjih.
- V obliki metanola ali amonijaka: vodik se kemično pretvori v tekoči metanol ali amonijak, kar omogoča lažji transport in skladiščenje.
- Kemično raztopljen v nosilnem mediju (LOHC): vodik se veže na tekoči nosilni medij, kar omogoča varno in učinkovito prenašanje.

Prenos vodika po plinovodih se izkazuje kot ena izmed najbolj ekonomičnih rešitev. V primerjavi z električnimi daljnovodi, na primer s 380-kilovoltno napeljavo z močjo 1,5 GW, lahko plinovod (PN 80, DN 1000) za prenos zemeljskega plina ali vodika prenese do desetkrat več energije, in to pri štirinajstkrat nižjih specifičnih stroških (Nowega GmbH, 2020).

4.2.1 Zmogljivost plinovodov pri prehodu na vodik

V nasprotju s splošnim prepričanjem je prenosna energijska gostota vodika le nekoliko manjša kot pri ZP, zato prehod z ZP na vodik minimalno vpliva na zmogljivost plinovoda za prenos energije. Čeprav ima ZP višjo zgorevalno toploto (približno $39,6 \text{ MJ/Sm}^3$) v primerjavi z vodikom ($12,6 \text{ MJ/Sm}^3$), to pomeni, da je za prenos enake količine energije potreben približno trikrat večji volumen vodika. Pomembni so parametri: gostota plina, hitrost pretoka in tlak. Vodik ima devetkrat nižjo gostoto kot ZP in doseže trikrat večjo hitrost pretoka. To omogoča prenos skoraj trikrat večjega volumna vodika pri enakem tlaku in v istem časovnem obdobju.

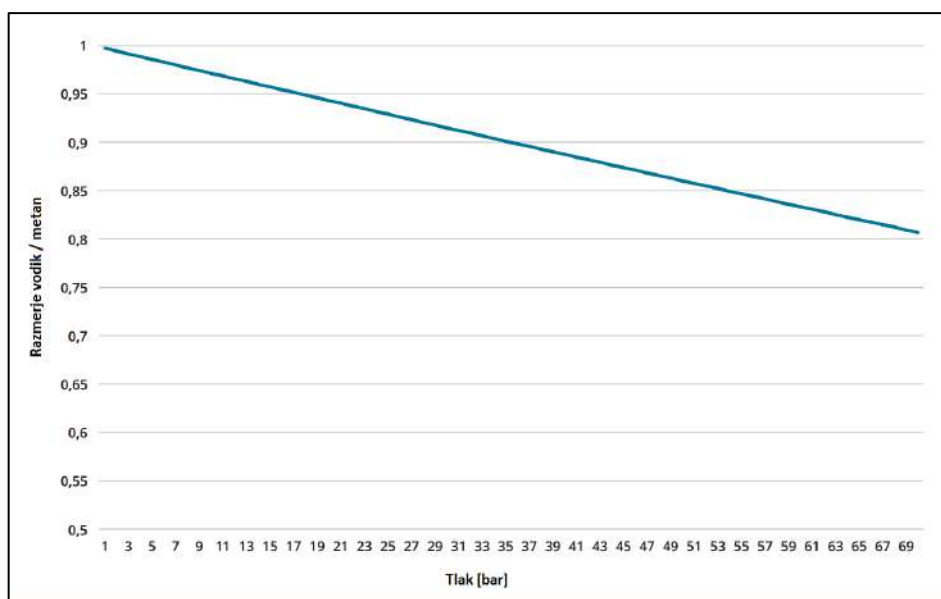
Zaradi teh lastnosti se skupna energijska gostota sistema le rahlo zmanjša, kar potrjujejo tudi grafikon.



Graf 2: Tlačna krivulja pri prenosu metana in vodika z enako energijsko vsebnostjo v visokotlačnem plinovodu dolžine 100 km in premera 1.000 mm

Vir: (Nowega GmbH, 2020)

Če želimo ohraniti enake tlačne izgube na določeni razdalji, prenos količine energije vodika doseže približno 83 % energije v primerjavi z zemeljskim plinom. Zaradi nižjega energijskega deleža na enoto prostornine mora biti pretok vodika skozi plinovod večji, da doseže enako količino energije.



Graf 3: Prenos energije pri enaki tlačni izgubi

Vir: (Nowega GmbH, 2020)

Kot je razvidno iz grafa 3, se pri nižjih tlakih razmerje med energijskim prenosom vodika in zemeljskega plina približa vrednosti 1 (0,997 pri atmosferskem tlaku), kar pomeni, da so razlike minimalne. Vendar pa pri višjih tlakih začne vpliv različnih koeficientov stisljivosti obeh plinov zmanjševati pretočne prednosti vodika. Kljub temu se ta negativni učinek delno kompenzira z višjo hitrostjo pretoka vodika, zaradi česar se energijski prenos le nekoliko zmanjša v primerjavi z obratovanjem na zemeljski plin.

4.3 Kompresorske in merilno regulacijske postaje

4.3.1 Kompresorske postaje in prilagoditve

Da bi lahko vodik vključili v prenosni sistem, ga je potrebno komprimirati na tlak, ki ustreza zahtevam omrežja. Za učinkovit prenos vodika, ki ima nižjo gostoto v primerjavi z ZP, so potrebni zmogljivejši in tehnično naprednejši kompresorji. Ti omogočajo doseganje visoke energijske gostote in optimalni izkoristek sistema, kar je ključno za zanesljiv prenos.

Za načrtovane plinovodne projekte, ki bodo realizirani za prenos vodika v kratkoročnem in srednjeročnem obdobju, so že na voljo preizkušene tehnologije batnih kompresorjev. Pri dolgoročnem prehodu na vodik, kjer bodo potrebne večje zmogljivosti prenosa v gigavatnem razredu, pa bo treba obstoječe turbokompresorske sisteme prilagoditi za uporabo z vodikom. Razvoj optimiziranih turbokompresorjev za vodik je predviden v prihodnjih letih, kar bo odvisno od povpraševanja na trgu.



Slika 12: Kompresorska postaja za ZP "Lippe"

Vir: (Nowega GmbH, 2020)

- **Vzdrževanje in prilagoditev kompresorske infrastrukture**

Nemška infrastruktura za ZP trenutno temelji na uporabi turbokompresorjev z enim ali dvema rotorjema, ki jih poganjajo plinske turbine ali elektromotorji z močjo do 30 MW. Prilagoditve teh sistemov so odvisne od deleža vodika v plinovodu:

- Do 10 % vodika: Obstoječi kompresorji lahko praviloma delujejo brez večjih sprememb.
- Do 40 % vodika: Ohišje kompresorja lahko ostane enako, vendar je treba prilagoditi impelerje.
- Nad 40 % vodika: Zamenjava kompresorja je neizogibna.

Zaradi intenzivnega razvoja na področju kompresorskih tehnologij je pričakovano, da bodo do leta 2030 turbine za pogon kompresorjev lahko delovale s 100-odstotnim vodikom ali pa bodo prilagodljive za takšno uporabo.

Kompresorji, ki jih poganjajo plinske turbine, pridobivajo energijo za pogon neposredno iz plinovoda, kar pomeni, da je njihovo delovanje odvisno od sestave goriva. Za uporabo z vodikovimi primesmi jih je potrebno ustrezno prilagoditi. Večina trenutno uporabljenih plinskih turbin za plinovode že omogoča delovanje z višjimi deleži vodika v gorivu, kar predstavlja pomembno prednost pri prehodu na vodikove mešanice. Če so kompresorji električno gnani, večje spremembe motorjev niso potrebne. Največkrat je treba prilagoditi hitrost in preveriti varnost pri delovanju z vodikom.

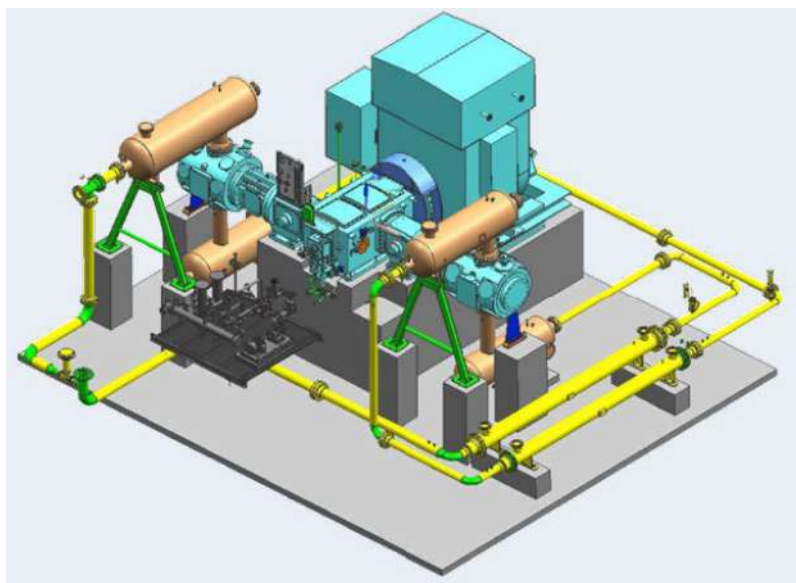
- **Povečanje prenosne zmogljivosti plinovodov za vodik**

Pri obratovanju plinovodov izključno z vodikom je mogoče doseči prenos energije na ravni 80–90 % kapacitete ZP, vendar z okoli trikrat večjo količino prenesenega plina. To omogoča višje hitrosti pretoka vodika v obstoječem omrežju, vendar zahteva tudi znatno večjo pogonsko moč v primerjavi s prenosom ZP. Za maksimalno izkoriščenost zmogljivosti prenosa vodika je potrebna približno trikrat večja pogonska moč ter posledično večje število turbin in kompresorjev. Pri prenosnih zmogljivostih do 750.000 Nm³/h so trenutno najprimernejša rešitev sodobni batni kompresorji, medtem ko bodo za večje zmogljivosti nad 750.000 Nm³/h potrebni prilagojeni in izboljšani turbokompresorji, katerih razvoj bo zaključen v nekaj letih.

- **Primerjava kompresorjev**

- **Batni kompresorji**

Batni kompresorji delujejo z visokim izkoristkom, saj plin komprimirajo v valjih. Prenosne zmogljivosti do 750.000 Nm³/h je mogoče doseči z dodatnimi valji, povečanjem pogonske moči in povezovanjem več kompresorjev v paralelni sistem, kar omogoča ekonomsko učinkovito rešitev za prenos plina.



Slika 13: Batni kompresor na vodik (vhodni tlak 24 bar – izhodni tlak 52–75 bar z močjo motorja 3MW)

Vir: (Nowega GmbH, 2020)

- **Turbokompresorji**

Turbokompresorji za mešanice plinov, ki vsebujejo visok delež vodika, se uporabljajo že desetletja. Čeprav je tehnologija na voljo, trenutno ti kompresorji dosegajo nižji izkoristek v primerjavi z batnimi kompresorji. Da bi dosegli sprejemljiv kompresijski faktor, je potrebno več rotorjev, kar nakazuje potrebo po nadaljnji optimizaciji za prihodnje sisteme z velikim obsegom prenosa vodika. Študije priporočajo povečanje obodne hitrosti rotorjev na več kot 700 m/s zaradi nizke molske mase vodika, da bi dosegli kompresijski faktor približno 1,3:1 na rotor. To pomeni približno trikratno povečanje hitrosti v primerjavi z obstoječimi rešitvami. Za to bodo potrebni novi materiali za impelerje, odporni na vodik, in zmožni prenašati visoke centrifugalne sile. Razvoj na tem področju že poteka, zato se pričakuje, da bodo ustrezni rotorji na voljo v prihodnjih letih.



Slika 14: Turbokompresor na vodik

Vir: (Nowega GmbH, 2020)

4.3.2 Regulacijske postaje (RP) in prilagoditve

Glede na trenutne zasnove regulacijskih postaj, ki so bile prvotno razvite za ZP, je bila oktobra 2020 izvedena študija, ki jo je izvedla organizacija Kiwa na Nizozemskem. Študija je preučevala delovanje in primernost nove RP za uporabo s 100-odstotnim vodikom. Cilj študije je bil ugotoviti vpliv vodika na ključne komponente, kot so tesnost ventilov, delovanje varnostnih naprav ter stabilnost tlaka. Pri testiranjih so preverjali zunanjo in notranjo tesnost, občutljivost zapiralnih ventilov ter stabilnost tlaka pri različnih pretokih. Rezultati so pokazali, da je RP, zasnovana za ZP, primerna tudi za vodik brez potrebnih sprememb. Sestavni deli, kot so regulator tlaka z varnostnim zapiralnim ventilom, filter, varnostni vhodni ventil ter pripadajoči ventili in cevi, so prestali test brez težav. Pri študiji so prišli do zaključka, da lahko obstoječe RP tehnično prenesejo prehod na vodik, vendar dolgotrajna vzdržljivost in trajnostni učinki še niso bili preučeni. Ta test je postavil osnovo za nadaljnjo optimizacijo RP in posledično tudi MRP v prihodnjem vodikovem gospodarstvu (Siestma, 2021).



Slika 15: Testirana regulacijska postaja

Vir: (Plin., 2021)

Na distribucijskem omrežju so obstoječe RP omejene na delovanje z mešanicami, ki vsebujejo največ 10 % vodika. Ta omejitev izhaja iz varnostnih zahtev, omejitev materialov in zagotavljanja skladnosti z obstoječimi regulativnimi standardi. Dodajanje večjih deležev vodika v ZP zahteva prilagoditve materialov, ki morajo biti odporni na vodikovo krhkost, in izboljšave tesnjenja, da se prepreči uhajanje plina, ki ga povzroča manjša vodikova molekulska masa. Prav tako je potrebno optimizirati regulatorje tlaka, da bi zagotavljali stabilno delovanje z vodikom, ki ima drugačne termodinamične lastnosti v primerjavi z ZP. Prilagoditve bodo morale slediti mednarodnim standardom in smernicam, ki bodo omogočali varno in zanesljivo vključevanje višjih deležev od 10-odstotnega vodika v obstoječa plinovodna omrežja.

Ob prehodu na nove energijske vire, kot je vodik, se RP soočajo z izzivom zagotavljanja optimalne zmogljivosti brez zmanjšanja varnosti ali učinkovitosti. Medtem ko trenutni testi nakazujejo tehnično izvedljivost za uporabo s 100 % vodika, trenutne smernice predlagajo konservativnejši pristop z omejitvijo na 10 %, dokler se ne izvedejo dodatne prilagoditve in ne vzpostavijo dolgoročno vzdržnih rešitev (NREL, 2022).

4.4 Shranjevanje vodika

Proizvodnja energije iz OVE, kot sta vetrna in sončna energija, je podvržena naravnim nihanjem, zato je učinkovito shranjevanje ključno za zagotavljanje zanesljive oskrbe. Vodik predstavlja obetavno rešitev zaradi svoje visoke energijske gostote, stisljivosti, prenosa ter možnosti dolgotrajnega in obsežnega shranjevanja.

Električna energija sama po sebi v prihodnosti verjetno ne bo mogla zagotoviti vseh potreb industrijskih kapacitet, zlasti z uporabo omrežnih rezervoarjev ali baterijskega shranjevanja, saj te možnosti pogosto niso ekonomsko izvedljive. Vodik pa se kaže kot idealna alternativa, saj omogoča visoko stopnjo stisljivosti in velike shranjevalne zmogljivosti. Poleg tega lahko učinkovito dopolnjuje elektroenergetsko omrežje, zlasti v kombinaciji z obstoječimi plinskimi skladišči, kar omogoča kratkoročno shranjevanje energije po relativno nizkih stroških.

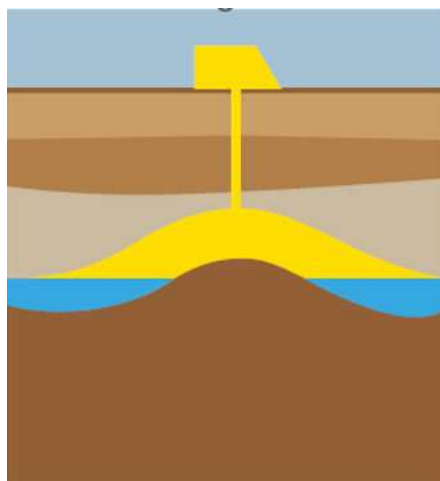
4.4.1 Podzemno shranjevanje vodika

Podzemno shranjevanje je ekonomsko in prostorsko učinkovita rešitev za shranjevanje velikih količin vodika.

Glavne vrste podzemnih skladišč:

- **Shranjevanje v poroznih kamninah**

Vodik se komprimira v porozne kamnine, podobno kot ZP v naravnih skladiščih ali izčrpanih nahajališčih nafte in plina. Shranjevanje v poroznih kamninah omogoča sprejem velikih količin plina, kar je ključna prednost za dolgoročno oskrbo energetskih sistemov. Vendar pa ta metoda zahteva visok tlak, proces shranjevanja in črpanja pa je zelo počasen. Dodatni izzivi vključujejo vpliv slane vode, ki lahko zmanjšuje stabilnost kamnine in povzroča korozijo jeklenih komponent. Poleg tega obstaja tveganje za mikrobiološke pretvorbe vodika, kar lahko vodi do izgub shranjenega plina. V EU je trenutno v uporabi 80 izčrpanih nahajališč ZP, pri čemer se jih večina nahaja v Nemčiji (Plin, 2023).

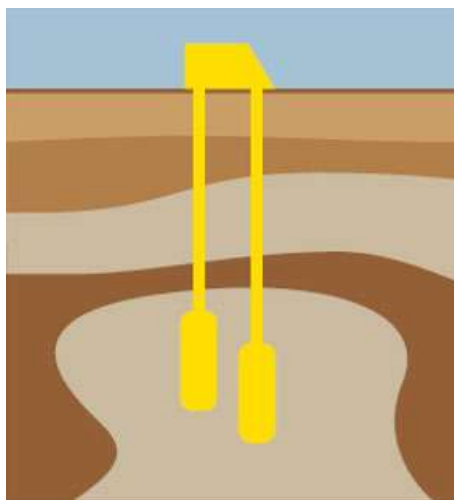


Slika 16: Shranjevanje v poroznih kamninah

Vir: (Nowega GmbH, 2020)

- **Shranjevanje v solnih jamah**

Solne jame se ustvarijo s topilnim rudarjenjem soli. So praktično neprepustne in odporne na mikrobiološke pretvorbe, zaradi česar so idealne za shranjevanje vodika. Shranjevanje vodika v solnih jamah ponuja visoko fleksibilnost zaradi možnosti hitrega injiciranja in črpanja plina, kar omogoča prilagodljivo oskrbo energetskega sistema. Poleg tega visoka stopnja celovitosti jam učinkovito preprečuje izgubo vodika, medtem ko odsotnost mikroorganizmov in ostankov ogljikovodikov zmanjšuje tveganje za kontaminacijo vodika. Kljub tem prednostim je uporaba solnih jam omejena na določene geografske regije, kot so Nemčija, Nizozemska in Združeno kraljestvo, kjer je skupaj okoli 65 takšnih jam. Poleg tega so te jame pogosto manjše v primerjavi z izčrpanimi plinskimi skladišči, kar omejuje količino shranjenega plina.



Slika 17: Shranjevanje v solnih jamah

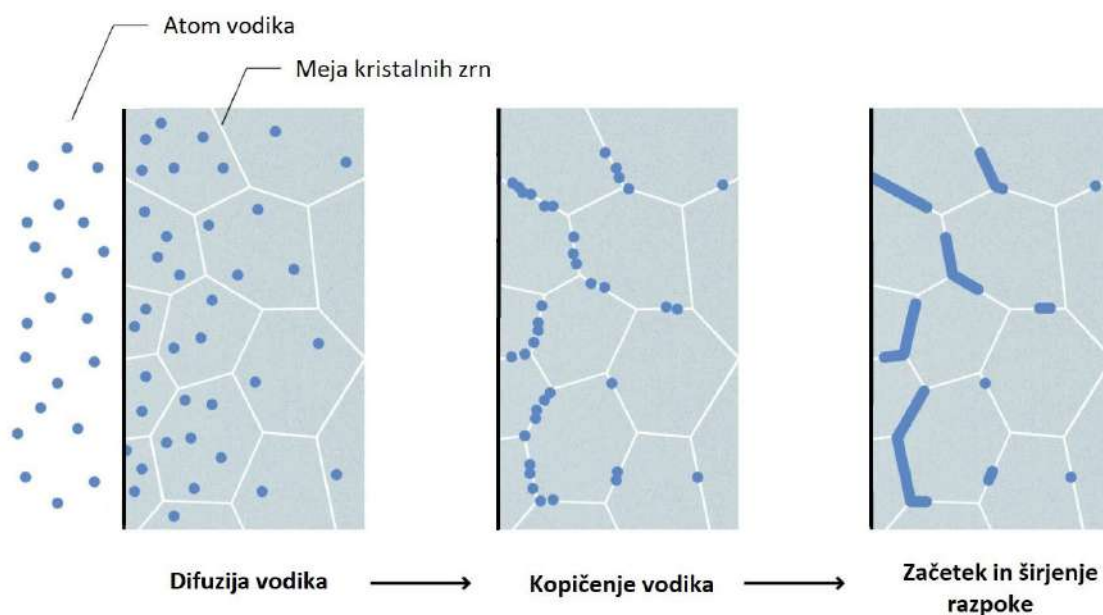
Vir: (Nowega GmbH, 2020)

Razvoj infrastrukture za shranjevanje energije je ključen za prilagoditev spremembam v energetskih sistemih, ki jih prinaša prehod na OVE. Zaradi njihove spremenljivosti in oddaljenosti proizvodnih mest se pojavljajo ozka grla v omrežju, kar povečuje potrebo po učinkoviti infrastrukturi za shranjevanje. Poleg tega bo takšna infrastruktura ključna za izvoz vodika izven Evropske unije ter za zagotavljanje zanesljive oskrbe in cenovne dostopnosti energetskih sistemov. Razvoj regionalnih trgov vodika bo povečal potrebo po različnih rešitvah za shranjevanje. Vodik omogoča obsežno centralizirano shranjevanje energije, kar zagotavlja ključne storitve, kot so strateške rezerve energije, sezonsko shranjevanje ter izravnava nihanj v proizvodnji. Evropska študija HyUnder, izvedena v okviru 7. okvirnega programa Evropske unije, je analizirala možnosti podzemnega shranjevanja vodika in ugotovila, da so solne jame najprimernejša rešitev zaradi svoje neprepustnosti, fleksibilnosti in zmernih stroškov. Po drugi strani pa izčrpana nahajališča zemeljskega plina ponujajo večjo razpoložljivost in veliko zmogljivost shranjevanja (HyUnder, 2015).

4.5 Vpliv vodika na materiale cevovodov in njegovi učinki

Vodik zaradi svoje majhne molekulske velikosti in sposobnosti prodiranja v strukturo kovinskih materialov vpliva na cevovode ter opremo za skladiščenje in prenos, kar lahko vodi do sprememb v mehanskih lastnostih in dolgoročne degradacije teh materialov. Ključni vpliv vodika je njegova difuzija v kovine, ki je odvisna od temperature, tlaka ter mehanskih in mikrostrukturnih lastnosti materiala. Poleg tega vodik vpliva na spremembe mikrostrukture materiala, kar vodi v poslabšanje mehanskih lastnosti in pojav vodikove krhkosti.

Vodikova krhkost je pojav, pri katerem vodik prodre v kovinsko mikrostrukturo in povzroči poslabšanje mehanskih lastnosti materiala, kar lahko vodi do poškodb in loma. Proces poteka v več fazah, od adsorpcije molekularnega vodika na površini kovine, disociacije v atomski vodik, difuzije v notranjost kovine do kopičenja v strukturnih nepravilnostih, kot so mikrorazpoke. Vodikova krhkost zmanjšuje plastičnost in lomno žilavost jekla, kar povečuje njegovo nagnjenost k lomu. Ta pojav je še posebej izrazit pri jeklih z višjimi trdnostnimi razredi, pri katerih je material bolj občutljiv na lokalizirane napetosti in mikrostrukturne nehomogenosti.



Slika 18: Difuzija vodika v kovinsko mikrostrukturo

Vir: Povzeto po (MTC, 2025)

4.5.1 Študije o vplivu vodika na materiale

V nadaljevanju so predstavljene tri študije, ki obravnavajo vpliv vodika na kovinske materiale, pri čemer se osredotočajo na pojav vodikove krhkosti, razpoke zaradi utrujenosti materiala in vpliv vodika na različne materiale cevovodov.

❖ Študija primera vodikove krhkosti v termoelektrarni

V znanstvenem članku *Hydrogen damage of steels: A case study and hydrogen embrittlement model*, objavljenem v reviji *Engineering Failure Analysis*, je bila analizirana odpoved kotlovske cevi iz ogljikovega jekla v termoelektrarni na premog moči 210 MW. Študija je pokazala, da je prišlo do strukturne poškodbe po več kot 73.000 obratovalnih urah. Cev z notranjim premerom 60 mm in debelino stene 6 mm je obratovala pri tlaku 155 bar in temperaturi 176 °C. Ugotovljeno je bilo, da sta k odpovedi prispevali lokalna kislina korozija, ki je povzročila nastajanje vodika, ter njegova difuzija v cev. Pri visokih temperaturnih ciklih je vpliv vodika povzročil razpoke v obliki "okna". Prav tako so bile zaznane nepravilnosti v geometriji zvara, ki so povzročile neenakomerno porazdelitev vodika v materialu. Mehanizmi

degradacije so vključevali povečano plastičnost zaradi vodika (HELP) in odcepitev materiala (HEDE), kar je zmanjšalo duktilnost jekla in vodilo do mehanske odpovedi cevi. Ti pojavi so bili podrobno analizirani v strokovni literaturi in potrjujejo pomen natančnega nadzora materialov v okoljih, kjer je prisoten vodik (MDPI, 2022).



Slika 19: Razpoka v obliki "okna" iz študije

Vir: (MDPI, 2022)

❖ **Odpornost plinovodov na razpoke zaradi utrujenosti materiala cevi pri mešanici vodika in zemeljskega plina**

V znanstvenem članku *Assessment of resistance to fatigue crack growth of natural gas line pipe steels carrying gas mixed with hydrogen*, objavljenem v reviji *International Journal of Hydrogen Energy*, so raziskovalci preučevali rast razpok zaradi utrujenosti materiala cevi na notranjih stenah jeklenih plinovodov, ki prenašajo mešanico vodika in zemeljskega plina. Eksperimentalna analiza je vključevala cevi distribucijskih linij s premerom med 150 mm in 300 mm, ki so bile izpostavljene dejanskim tlačnim nihanjem. Rezultati so pokazali, da tudi v najbolj neugodnih pogojih cevi tipa X42 z začetnimi razpokami, manjšimi od 40 % debeline stene, ne dosežejo kritične globine (75 % debeline stene) v obdobju 100 let. Na podlagi teh ugotovitev je bilo sklenjeno, da je prenos mešanice vodika in zemeljskega plina v kovinskih plinovodih varen, če začetna globina razpok ne presega 40 % debeline stene (MDPI, 2022).

❖ **Vpliv vodika na materiale in plinske naprave**

V okviru evropskega raziskovalnega projekta THyGA so raziskovalci analizirali vpliv mešanja vodika z zemeljskim plinom na gospodinjske in industrijske naprave ter materiale cevovodov. Raziskave so bile osredotočene na vodikovo krhkost pri različnih materialih, vključno z ogljikovimi in nerjavnimi jekli, bakrom, medenino, aluminijevimi zlitinami ter PE. Rezultati so pokazali, da pri nizkih tlakih plina (30–50 mbar) do 50 % vodikove vsebnosti v mešanici ne

povzroča večjih težav za kovinske materiale. Vendar so se nizkolegirana jekla izkazala za najbolj občutljiva na vodikovo krhkost, kar pomeni, da bi bile pri teh materialih potrebne dodatne prilagoditve in nadzor. Nasprotno pa dolgotrajna izpostavljenost vodiku ni povzročila degradacije polimernih materialov, kot je PE, kar potrjuje primernost teh materialov za transport mešanice vodika in zemeljskega plina pri nizkih tlakih (MDPI, 2022).

4.6 Varnostni ukrepi za vključevanje vodika v obstoječe plinovodne sisteme

Zagotavljanje varnosti pri vključevanju vodika v obstoječe plinovodne sisteme zahteva celovit pristop, ki vključuje tehnične prilagoditve, operativna tveganja in regulativne ukrepe. Ključni izzivi so vodikova krhkost materialov, večje energetske zahteve za komprimiranje ter tveganje zaradi uhajanja, ki lahko povzroči eksplozije ali požare zaradi širšega vnetljivega razpona vodika. Mikro uhajanja so posebej problematična, saj vodik lažje prehaja skozi neustrezna tesnila in spoje, kar zahteva napredne detekcijske tehnologije. Dolgotrajna izpostavljenost vodiku lahko pospeši staranje materialov in poveča tveganje za nenadne okvare sistema. Na podlagi analize občutljivosti materialov in integritete omrežja je slovenski operater prenosnega sistema ZP predlagal več ključnih ukrepov za zagotavljanje varnosti in zanesljivosti sistema:

- **Pogostejši pregledi plinovodov:** Zaradi višjega obratovalnega tlaka in občutljivosti materialov na vodik je potrebno pogosteje izvajati vizualne preglede, meritve trdote materialov in kontrole uhajanja, še posebej na kritičnih točkah sistema.
- **Postopna zamenjava občutljivih komponent:** Pri volumskih koncentracijah vodika do 10 % večjih menjav ključnih delov ni potrebno. Za višje koncentracije vodika (nad 10 %) pa je predvidena zamenjava komponent, ki so najbolj občutljive na vodikovo krhkost.
- **Skrb za kakovost zvarov in materialov:** Zvari so zaradi svoje višje trdote še posebej občutljivi na vodik. Zato se priporoča uporaba materialov z nižjo natezno trdnostjo (pod 500 MPa) in toplotno obdelavo za zmanjšanje občutljivosti.
- **Katodna zaščita:** Upoštevati je treba, da previsoki katodni potenciali lahko povečajo krhkost materialov zaradi vodika. Redne meritve in prilagoditve sistema so zato ključnega pomena.
- **Prilagoditve za mešanice plina in vodika:** Pri uvajanju višjih vsebnosti vodika v plinovodni sistem (nad 20 %) je treba nadgraditi vse ključne dele omrežja in zagotoviti, da materiali ustrezajo najvišjim varnostnim standardom.

- **Varjenje in obdelava materialov:** Za preprečevanje vnosa vodika med varjenjem je nujno izvajati postopke, ki zmanjšujejo tveganje za vodikovo krhkost, ter zagotoviti toplotno obdelavo zvarov.
- **Priprava na novogradnje:** Definicija pogojev za vgrajene materiale in komponente, ki bodo lahko varno delovali z mešanicami plina in vodika, vse do 100 % vodika (Plinovodi, 2024).

4.7 Razširjen scenarij za vzpostavitev proizvodnje zelenega vodika

Prehod na zeleni vodik zahteva poleg tehnološkega razvoja elektrolizatorjev tudi zadostne kapacitete OVE ter prilagodljive sisteme za shranjevanje in prenos. Trenutno večina proizvodnje vodika temelji na parni reformaciji fosilnih goriv, vendar se s širjenjem OVE in infrastrukture predvideva postopni prehod na trajnostne rešitve. Študije in modelni scenariji razkrivajo, da kombinacija vetrnih elektrarn in prilagodljivih sistemov za shranjevanje vodika omogoča stabilno in zanesljivo proizvodnjo vodika. V začetni fazi prehoda je pričakovano, da bo del oskrbe še vedno temeljil na sivi vodikovi proizvodnji.

Projekt GET H2 Nucleus razvija prvo javno dostopno vodikovo infrastrukturo v Nemčiji na razdalji 130 km med Lingenom in Gelsenkirchnom. Cilj projekta je prikazati celoten procesni tok za zanesljivo in trajnostno industrijo vodika:

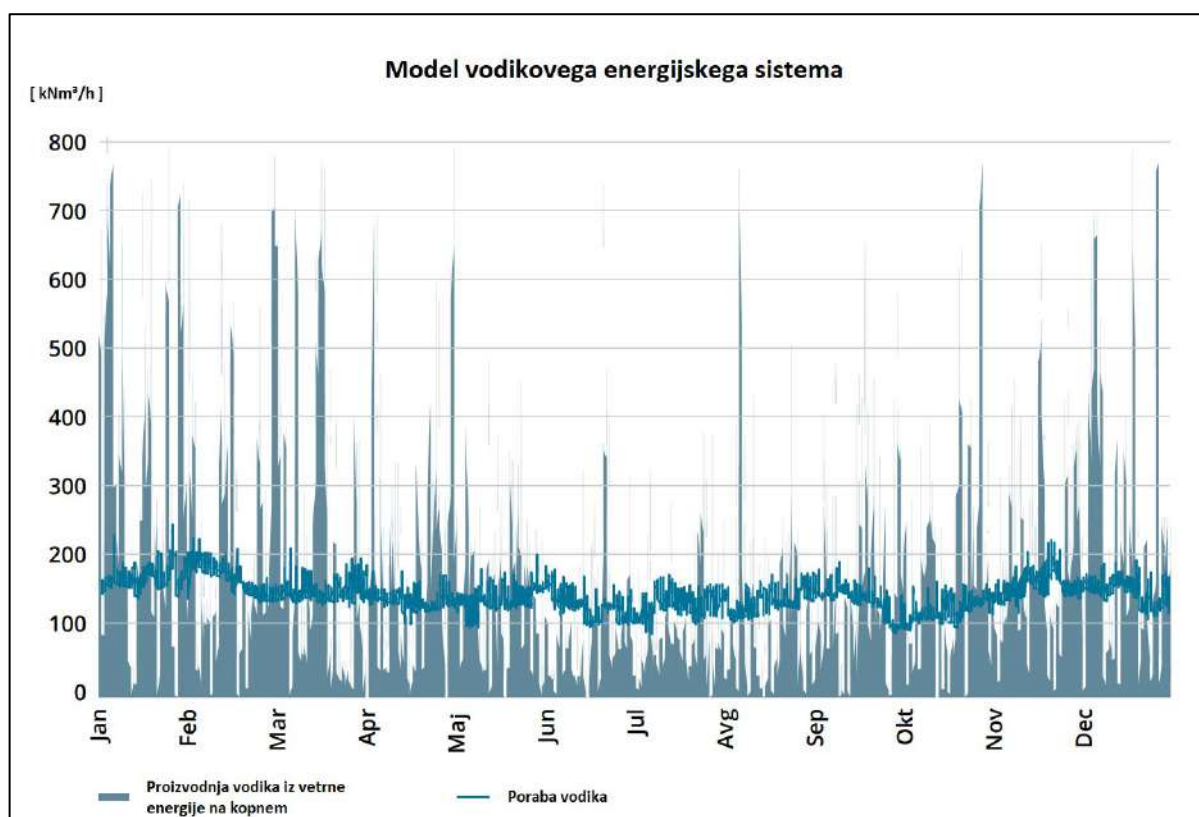
- **Proizvodnja zelenega vodika:** Na RWE-jevi elektrarni v Lingenu bo postavljena elektrolizna naprava (100 MW) z uporabo vetrne energije.
- **Prenos:** Obstoječe plinske napeljave bodo popolnoma prilagojene prenosu vodika in dopolnjene z manjšimi novimi odseki.
- **Uporaba:** Vodik bo dobavljen kemičnim obratom in rafinerijam v Lingenu, Marlu in Gelsenkirchnu za zmanjšanje emisij ogljikovega dioksida.
- **Širitev:** Načrtovana je priključitev obstoječih jamskih skladišč in dodatne proizvodnje vodika ter novih uporabnikov.

Na podlagi ključnih podatkov projekta GET H2-Nucleus je mogoče oblikovati realističen sistem upravljanja z vodikom. Poudarek je bil na naslednjih skupinah uporabnikov:

- Industrija: Trije odjemalci (npr. rafinerije, kemični obrati) s posameznim povpraševanjem do 50.000 m³ H₂/h.
- Transport: Dobava 25.000 Nm³ H₂/h, kar zadošča za 50 % voznega parka avtobusov v Severnem Porenju-Vestfaliji.
- Ogrevanje: Oskrba občinskega plinskega omrežja s 50.000 Nm³ H₂/h in 3.000 urami delovanja pri polni obremenitvi.
- Povratna proizvodnja elektrike: Napajanje plinske turbine (60 MW_e) za 500 ur delovanja letno v obdobjih nizke vetrne proizvodnje.

Začetni scenarij: Oskrba z vodikom iz 100 % energije kopenskih vetrnih elektrarn

Na grafu 4 je prikazana potreba strank v primerjavi z morebitno razpoložljivo energijo za proizvodnjo vodika iz regionalne vetrne energije na kopnem.



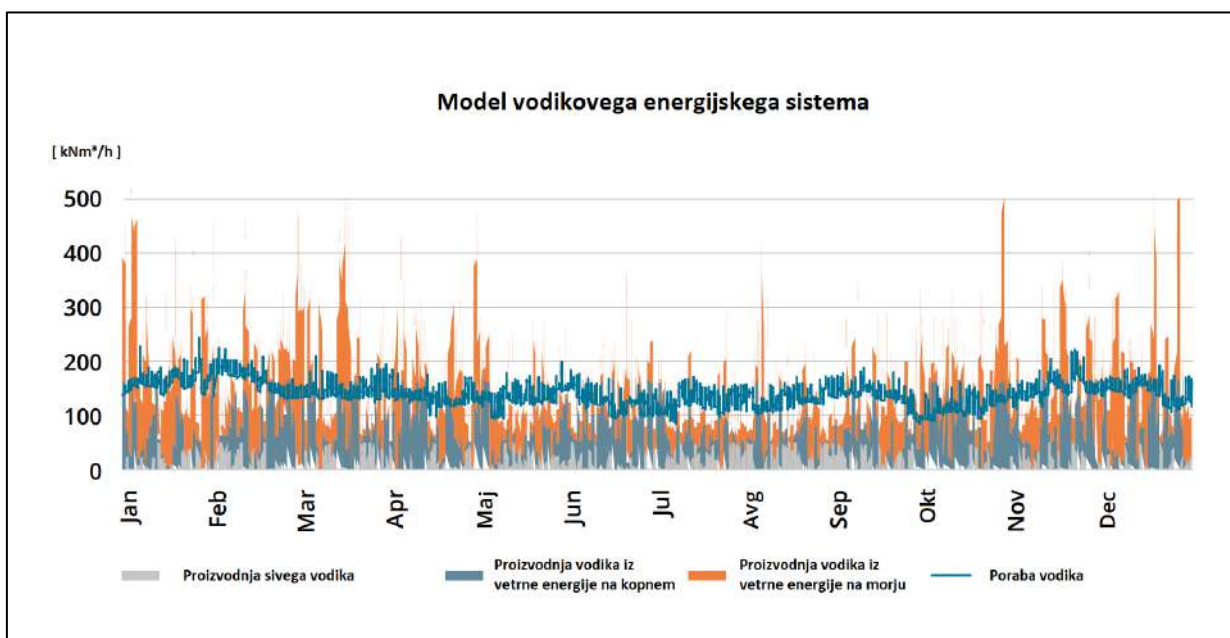
Graf 4: Graf povpraševanja po vodikom in proizvodnja zelenega vodika

Vir: (Nowega GmbH, 2020)

Modelni izračun razkriva velika neskladja med povpraševanjem po energiji in njeno razpoložljivostjo. Za zagotavljanje stabilne proizvodnje vodika in obvladovanje vršnih obremenitev bi bile potrebne štirikrat večje proizvodne zmogljivosti od povprečnega povpraševanja. To bi zahtevalo obsežne shranjevalne kapacitete vodika, proizvedenega v obdobjih visoke proizvodnje elektrine energije iz OVE, ali pa odvisnost od obstoječih proizvodnih virov sivega vodika s parno izboljšavo metana. V teh pogojih se širitev sistema ekološko in ekonomsko kaže kot neizvedljiva.

Razširjeni scenarij: Oskrba z vodikom iz mešanih virov – kombinacija obnovljivih virov in sivega vodika

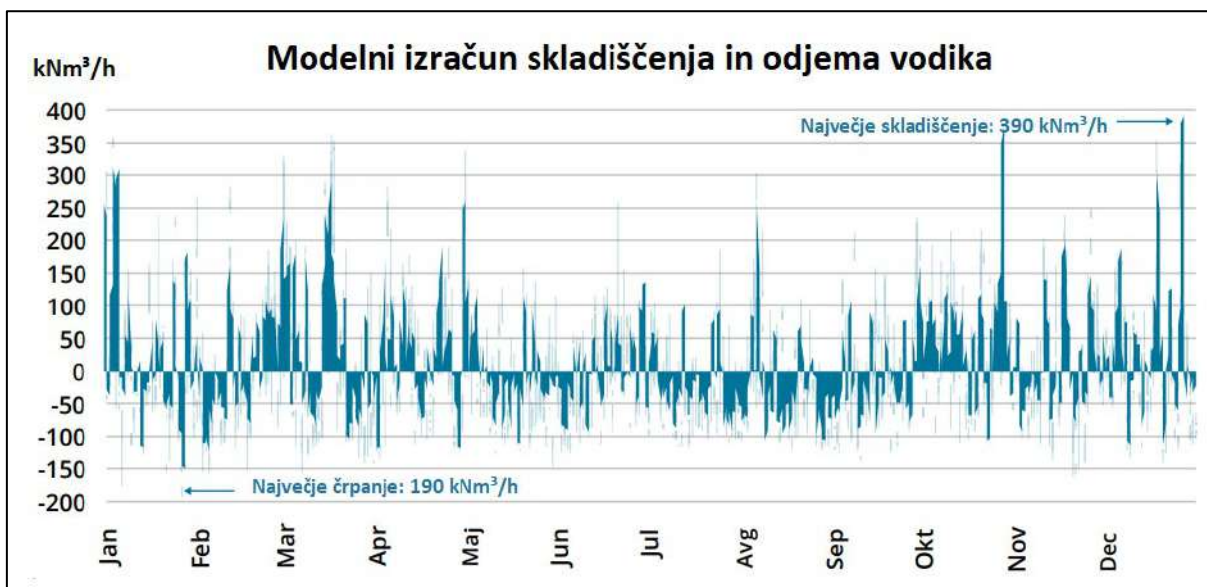
Kombinacija vetrne energije s kopnega in morja, skupaj z uporabo popolnoma prilagodljivega skladiščnega sistema (na primer skladiščenje v solnih jamah), omogoča pomembno stabilizacijo proizvodnje vodika in približevanje proizvodne krivulje potrebam porabe. V začetni fazi vzpostavitve sistema verjetno ne bodo na voljo vse kapacitete, potrebne za proizvodnjo zelenega vodika. V tem obdobju bi lahko ozka grla začasno kompenzirali z obstoječimi zmogljivostmi za parno reformiranje vodika, ki bi jih nato postopoma nadomestili z elektrolizo, ko bi se obseg OVE povečeval. V obravnavanem sistemu bi za proizvodnjo vodika v začetni fazi vmesno raven predstavljalo 13 % sivega vodika.



Graf 5: Povpraševanje po vodikom in proizvodnja zelenega in sivega vodika

Vir: (Nowega GmbH, 2020)

Na grafu 5 je vidna realnejša začetna faza vzpostavitve trga vodika, ki temelji pretežno na proizvodnji iz OVE. Ta model omogoča pokrivanje preostalih odstopanj med proizvodnjo in povpraševanjem z uporabo obstoječih podzemnih skladiščnih zmogljivosti. Podzemna skladišča so posebej primerna za kratkoročno uravnavanje naravnih nihanj v proizvodnji zelenega vodika.



Graf 6: Kapacitete skladiščenja in črpanja vodika

Vir: (Nowega GmbH, 2020)

Iz grafa 6 je razvidno, da vršne obremenitve pri skladiščanju dosežejo do 390.000 Nm³/h, medtem ko pri črpanju znašajo največ 190.000 Nm³/h. Ta nihanja je načeloma mogoče učinkovito uravnavati z uporabo obstoječih jamskih skladišč (Nowega GmbH, 2020).

5 PREGLED IN UPORABA TEHNIČNIH SMERNIC ZA KOMPONENTE PLINOVODNEGA SISTEMA

Evropski tehnični odbor CEN/TC 234, **Infrastruktura za plin**, je ključni tehnični odbor, ki zajema vse vidike plinske infrastrukture, od vstopa plina v prenosno omrežje do priključkov plinskih naprav. Čeprav je bil prvotno ustanovljen za potrebe ZP, se zaradi novih trendov in potreb njegovo delovanje zdaj širi tudi na druge pline, kot sta vodik in biometan. Delovanje odbora temelji na organiziranju in delu specializiranih delovnih skupin (WG - Working Group), ki so osredotočena na specifična tematska področja. Vsaka delovna skupina ima jasno določen mandat za pripravo standardov, smernic ali drugih dokumentov, ki pripomorejo k razvoju varne in učinkovite plinske infrastrukture.

Trenutno odbor CEN/TC 234 prioriteto obravnava tri ključna področja:

- Metan: Poudarek na zmanjševanju emisij in trajnostnem ravnanju z metanom v plinski infrastrukturi.
- Vodik: Priprava smernic in standardov za integracijo vodika v obstoječe plinovodne sisteme.
- Sistemi za varno in celostno upravljanje: Razvoj standardov za zagotavljanje varnosti, učinkovitosti in zanesljivosti celotne plinovodne infrastrukture.

❖ EMISIJE METANA (WG 14)

Tehnični odbor CEN/TC 234 je ustanovil delovno skupino za obravnavo emisij metana in uskladitev z globalnimi standardi. Sodelujejo s CEN/TC 12, ISO/TC 67 in CEN/TC 282, ki pokrivajo industrijo ZP in LNG. Skupina pripravlja tehnično specifikacijo za identifikacijo in količinsko določanje emisij metana v prenosnih, distribucijskih in skladiščnih sistemih ter LNG terminalih. Specifikacija bo veljala za pline z visokim deležem metana, vendar ne bo zajemala emisij, povezanih z uporabo plinov, polnilnih postaj za LNG in CNG, biometanskih obratov, procesov utekočinjanja ZP in prenosa LNG.

❖ KAKOVOST PLINA (WG 11)

Eden izmed načinov prenosa in distribucije vodika je uporaba obstoječih omrežij ZP, pri čemer je ključno določanje kakovosti vodika. Standard **SIST EN 16726:2016** je bil že posodobljen na **SIST EN 16726:2016+A1:2018**, ki določa zahteve za kakovost plina in upošteva vpliv vodika na parametre, kot so relativna gostota, metansko število, rosišče ogljikovodikov in vode ter Wobbejev indeks. Prav tako je bil standard **SIST EN 437:2019** nadomeščen s **SIST EN 437:2021**, ki določa preskusne pline in postopke preskušanja za plinske naprave, ki bodo uporabljale zmesi ZP in vodika. S tem so že vzpostavljeni osnovni standardi za zagotavljanje varnosti in učinkovitosti uporabe vodika v obstoječem plinovodnem omrežju.

❖ VODIK V INFRASTRUKTURI ZA ZP (WG 13)

Ustanovljena je bila nova delovna skupina, katere cilj je usmerjanje evropskega projekta "Odstranimo tehnične ovire za uporabo vodika v omrežjih ZP in pri končnih uporabnikih." Projekt vključuje tehnične odbore za infrastrukturo, plinomere, kriogene posode, plinske naprave, tesnila in tudi tehnični odbor za biometan. Skupina WG 13 deluje kot povezovalni člen med raziskavami GERG in tehničnimi odbori.

Glavne naloge skupine so določitev kakovosti vodika, oceno vpliva na infrastrukturo in zagotavljanje varnega delovanja omrežij. Tehnični odbor CEN/TC 234 je izdal tehnično poročilo **CEN/TR 17797:2022**, ki obravnava posledice dodajanja vodika v plinsko infrastrukturo in standardizacijske potrebe. Poročilo vključuje vpliv vodika na varnostne značilnosti, materiale, energijsko primerjavo z ZP ter prilagoditve infrastrukture. Služi kot podlaga za revizijo obstoječih standardov in razvoj novih smernic za varno uporabo vodika v plinskih omrežjih.

❖ PLINSKA NAPELJAVA (WG 1)

Standard **SIST EN 1775:2008** določa funkcionalna priporočila za plinovode v stavbah z najvišjim delovnim tlakom do 5 bar, zagotavljajoč varne distribucije plina. Trenutno ostaja nespremenjen.

Za plinske zmesi, ki vsebujejo do 20 % vodika in delovni tlak 1 bar (oziroma največ do 5 bar), so zahteve tega standarda še vedno ustrezne. To pomeni, da trenutna različica standarda zadostuje za varno in učinkovito obratovanje plinovodov z mešanico ZP in vodika do določenih deležev in tlakov.

❖ **INDUSTRIJSKI CEVOVODI (WG 8)**

Delovna skupina WG 8 je posodobila standarda **SIST EN 15001-1:2023** in **SIST EN 15001-2:2023**, ki obravnavata plinske napeljave z delovnim tlakom nad 0,5 bar za industrijsko uporabo in nad 5 bar za industrijsko in neindustrijsko uporabo. Prvi del določa funkcionalne zahteve za načrtovanje, izbiro materialov, gradnjo, preskušanje in nadzor, drugi del pa pokriva začetek obratovanja, vzdrževanje in varno delovanje.

Standardi zajemajo delovne pogoje pri temperaturah od –20 °C do 40 °C in tlak do vključno 60 bar, pri višjih vrednostih pa veljajo dodatne zahteve iz **SIST EN 13480:2024** (vseh delov). Nova izdaja vključuje ZP, UNP, LNG in biometan, ne pa zmesi ZP z vodikom. Visoke koncentracije vodika bi lahko bile vključene v prihodnje, a zahtevajo dodatne analize vpliva na materiale.

Ključne tehnične spremembe vključujejo razširitev področja standarda, posodobitev povezav z drugimi standardi, uskladitev izrazov z Direktivo PED (2014/68/EU), pojasnila glede varjenja in nova pravila za neporušitveno preskušanje. Drugi del standarda prinaša dodatne zahteve za tehnične mape.

❖ **SISTEMI OSKRBE S PLINOM DO VKLJUČNO 16 BAR IN PRESKUŠANJE TLAKA (WG 2)**

Evropski standardi za cevovodne sisteme določajo zahteve za plinsko infrastrukturo z najvišjim delovnim tlakom do 16 bar in vključujejo pet glavnih delov, ki pokrivajo različne vidike:

- **SIST EN 12007-1:2013** določa splošne funkcionalne zahteve.
- **SIST EN 12007-2:2013** se osredotoča na plinovode iz polietilena (PE) do 10 bar, pri čemer se njegova posodobitev usklajuje s skupino standardov **SIST EN 1555:2021**.
- **SIST EN 12007-3:2015** določa posebne zahteve za jeklene cevovode.
- **SIST EN 12007-4:2013** pokriva posebne zahteve za obnovo cevovodov.

Posodobljen je bil **SIST EN 12007-5:2025**, ki določa funkcionalne zahteve za priključne cevovode. Nova izdaja vključuje dodatek A o izbiri materialov in načinih spajanja ter razširitev standarda na zmesi ZP z vodikom.

Dodatno **SIST-TS CEN/TS 12007-6:2021** uvaja neplastificirani poliamid (PA-U) kot material za cevovode zaradi njegove odpornosti na vodik in metan.

Za varno delovanje sistemov ostaja ključen tudi **SIST EN 12327:2013**, ki določa tlačne preskuse in postopke za začetek ter prenehanje obratovanja plinskih sistemov.

Nove posodobitve zagotavljajo varnost, zanesljivost in skladnost s sodobnimi tehnološkimi zahtevami ter omogočajo integracijo vodika v obstoječo infrastrukturo.

❖ **CEVOVODNI SISTEMI ZA NAJVIŠJI DELOVNI TLAK NAD 16 BAR (WG 3)**

Delovna skupina WG 3 je posodobila standard **SIST EN 1594:2024**, ki določa funkcionalne zahteve za visokotlačne jeklene plinovode z delovnim tlakom nad 16 bar in temperaturnim območjem od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Standard vključuje cevi, ventile, spoje in drugo opremo iz nelegiranega ali malo legiranega ogljičnega jekla, primerno za ZP, biometan, vodik in njihove zmesi, če je to tehnično potrjeno.

Posodobljen je bil tudi standard **SIST EN 12732:2022**, ki določa zahteve za varjenje jeklenih cevovodov, vključno z varjenjem med obratovanjem in neporušitvenimi preiskavami. Spremembe vključujejo preglednice standardov, posodobljene varnostne ukrepe za varjenje v obratovanju, avtomatsko ultrazvočno preskušanje ter stopnje sprejemljivosti po evropskih smernicah.

Prav tako je bil posodobljen tudi **SIST EN ISO 5817:2023**, ki določa stopnje sprejemljivosti talilno zvarjenih spojev na jeklu, niklju in titanu, pri čemer upošteva tudi zahteve za varjenje cevovodov za nekonvencionalne pline.

❖ **PODZEMNA PLINSKA SKLADIŠČA (WG 4)**

Evropski standard **SIST EN 1918** določa funkcionalna priporočila za podzemna plinska skladišča v različnih geoloških strukturah (vodonosniki, naftna/plinska polja, solne in skalne jame) ter za nadzemno opremo. Strokovnjaki ocenjujejo, da je preizkušanje za vključevanje vodika v standard, saj vpliv njegovega shranjevanja še ni dovolj raziskan.

Dosedanje raziskave kažejo, da manj kot 1 % vodika zahteva le manjše prilagoditve, pri 1–20 % deležu so potrebne večje naložbe, pri deležu nad 20 % pa nekatera skladišča ne bodo več primerna. Solne jame so najbolj primerne za shranjevanje vodika, medtem ko bi pri drugih skladiščih lahko prišlo do večjih tehničnih izzivov. Trenutno se pripravlja nov dokument za preskušanje poroznih rezervoarjev, kar bo ključno za nadaljnji razvoj tehnologije.

❖ MERILNI SISTEMI (WG 5)

Nekonvencionalni plini, kot sta vodik in bioplín z visokim deležem ogljikovega dioksida, imajo drugačne fizikalne lastnosti, kar lahko vpliva na območje obratovanja glede na tlak, temperaturo in pretok. Obstoječa tehnologija merilnih sistemov, zasnovana za ZP, še ni potrjena kot primerna za nove pline. Zato delovna skupina WG 5 še ni posodobila standarda **SIST EN 1776:2016**, ki določa funkcionalne zahteve za merilne sisteme. Skupina bo počakala na izsledke tehničnega odbora CEN/TC 237 Plinomeri, preden predlaga spremembe.

❖ REGULACIJA TLAKA PLINA (WG 6)

Delovna skupina WG 6 bo posodobila standarda **SIST EN 12186:2015** (plinske postaje za regulacijo tlaka) in **SIST EN 12279:2000** (naprave za regulacijo tlaka na priključnih vodih), ki veljata za pline prve in druge družine po **SIST EN 437:2021**. Naprave, zasnovane za ZP, bodo pred uporabo zmesi ZP in vodika morale prestatí individualno oceno. Posodobitve bodo vključevale razširitev področja standardov, povezavo z novo tehnologijo in preverjanje tesnosti.

Poleg tega WG 6 pripravlja novo skupino standardov za dodajanje obnovljivih plinov v plinsko omrežje, razdeljeno na tri dele:

1. del – Splošne zahteve
2. del – Posebne zahteve za dodajanje biometana
3. del – Posebne zahteve za dodajanje vodika

Najhitreje bo napredoval 2. del, zaradi obstoječih standardov **SIST EN 16723**, ki določajo specifikacije za biometan v omrežjih in prometu.

❖ KOMPRESORSKE POSTAJE (WG 7)

Standard **SIST EN 12583:2022+A1:2025** je že posodobljen in določa zahteve za kompresorske postaje, ki so ključne za vzdrževanje tlaka pri prenosu plina. Sodobne plinske turbine lahko brez prilagoditev delujejo z mešanicami do 5 % vodika, pri nad 10 % pa je potrebna individualna ocena postaj.

Posodobljena različica standarda vključuje zahteve za načrtovanje, izvedbo, preskušanje, obratovanje, vzdrževanje in odstranjevanje izrabljenih delov. Velja za nove postaje z delovnim tlakom nad 16 bar in močjo nad 1 MW, ne pa za obstoječe postaje.

Nove tehnične spremembe vključujejo:

- dodatne zahteve za vodik,
- upravljanje z emisijami metana,
- določanje emisij dušikovih oksidov in ogljikovega monoksida,
- posodobljene povezave z evropskimi standardi in
- okoljske smernice za zmanjšanje vpliva plinske infrastrukture skozi celoten življenjski cikel v skladu s **SIST-TP CEN/TR 16388:2013**.

❖ SISTEMI VARNEGA UPRAVLJANJA (SMS) IN SISTEMI CELOSTNEGA UPRAVLJANJA (PIMS) (WG 12)

Standard **SIST EN 17649:2022** je že posodobljen in nadomešča ter združuje prejšnja standarda **SIST EN 16348:2013** in **SIST EN 15399:2019**. Določa zahteve za razvoj in izvajanje sistema varnega upravljanja (SMS) ter celostnega upravljanja plinovodnih sistemov (PIMS) za prenosno in distribucijsko plinsko infrastrukturo.

Standard se nanaša na varnostne dejavnosti in procese, ki jih izvajajo upravljavci plinskih omrežij, vključno z zunanjimi izvajalci. Zajema nestrupene in nekorozivne pline druge družine v skladu s **SIST EN 437:2021**, vključno z biometanom, vodikom in nekonvencionalni plini, ter določa smernice za varno in učinkovito upravljanje infrastrukture v skladu z najnovejšimi tehnološkimi in varnostnimi zahtevami.

Vir: (Plin, Pregled dela evropskega tehničnega odbora, 2021)

6 OCENA STROŠKOV IN KORISTI UVEDBE VODIKA V PLINOVODNA OMREŽJA

6.1 Krovna tema »TRAJNOST«

Trajnost je osrednja tema sodobne družbe in ključen vidik trajnostnega prehoda, ki jo obravnava diplomska naloga. Prehod na vodik kot energent prihodnosti je tesno povezan z trajnostjo, saj omogoča zmanjšanje emisij toplogrednih plinov, izboljšanje kakovosti življenja in ohranitev naravnih virov.

Uporaba OVE za proizvodnjo zelenega vodika predstavlja pomemben korak k trajnostnemu razvoju. S tem se omogoča prehod na nizkoogljični energetske sistem, ki temelji na čistih tehnologijah in dekarbonizaciji industrijskih procesov. Prilagoditev obstoječih plinovodnih omrežij za prenos vodika omogoča optimalno izrabo že obstoječe infrastrukture, kar zmanjšuje potrebo po novih gradnjah in s tem vpliva na okolje.

Vodik kot energent dodatno prispeva k trajnosti z zmanjševanjem lokalnih onesnaževal, kot so dušikovi oksidi in trdni delci, kar je posebej pomembno za urbana območja. Poleg tega tiho in čisto delovanje vodikovih gorivnih celic izboljšuje kakovost življenja prebivalstva in prispeva k večjemu okoljskemu udobju.

Povezava med trajnostjo in vodikom kot energentom je ključna za doseganje dolgoročnih podnebnih ciljev in energetske neodvisnosti. Diplomska naloga izpostavlja, da prehod na vodik ne pomeni zgolj tehnološkega izziva, temveč tudi priložnost za vzpostavitev trajnostnega energetskega sistema, ki bo uravnotežen z varstvom okolja in dobrobitjo družbe.

6.2 Trajnostni energetski prehod in vloga vodika

Evropska unija si prizadeva postati prva podnebno nevtralna celina do leta 2050. Za doseg tega cilja je nujno zmanjšanje emisij toplogrednih plinov, povečanje energetske učinkovitosti in obsežen prehod na obnovljive vire energije. Kot ključni energent za razogljičenje industrije, prometa in energetske infrastrukture je prepoznan vodik, saj omogoča dolgoročno shranjevanje energije in nadomešča fosilna goriva v sektorjih, kjer elektrifikacija ni zadostna rešitev.

V zadnjih letih so bila v EU sprejeta ambiciozna prizadevanja za povečanje proizvodnje in uporabe vodika. Evropska komisija je leta 2022 v okviru načrta REPowerEU močno okrepila strategijo za vodik, kar vključuje povečane cilje za proizvodnjo in uvoz obnovljivega vodika

do leta 2030. Hkrati so bile uvedene nove finančne spodbude, kot je Evropska vodikova banka, ki podpira razvoj celotne vrednostne verige vodikovih tehnologij.

Kljub temu pa Evropsko računsko sodišče opozarja, da EU ne bo dosegla vseh zastavljenih ciljev, saj se razvoj infrastrukture in industrijskih zmogljivosti ne odvija dovolj hitro. Ključne izzive predstavljajo visoki stroški proizvodnje, pomanjkanje investicij in potreba po jasnejših regulativnih smernicah.

6.2.1 REPowerEU in nadgradnja evropske vodikove strategije

Načrt REPowerEU, ki ga je Evropska komisija predstavila leta 2022, je eden najpomembnejših energetskega načrta zadnjega desetletja in osrednji mehanizem za zmanjšanje energetske odvisnosti Evrope od fosilnih goriv. Predstavljen je bil kot odziv na geopolitične razmere in posledično energetske krize, ki jo je povzročila vojna v Ukrajini. Glavni cilji načrta so pospešiti prehod na obnovljive vire energije, zagotoviti energetske varnost ter okrepiti industrijsko konkurenčnost EU.

Ključni ukrepi REPowerEU na področju vodika vključujejo:

- **Povečanje ciljev za OVE:** Novembra 2023 je začela veljati revidirana direktiva o energiji iz obnovljivih virov, ki določa, da mora biti do leta 2030 42,5 % energije iz OVE, pri čemer je cilj doseči 45 %. To predstavlja skoraj podvojitev deleža obnovljivih virov energije v EU v primerjavi z letom 2020.
- **Določitev ciljev za vodik:** REPowerEU predvideva proizvodnjo 10 milijonov ton obnovljivega vodika v EU in uvoz dodatnih 10 milijonov ton na leto do leta 2030. To je znatno povečanje v primerjavi s prejšnjimi strategijami, ki so bile osredotočene predvsem na lokalno proizvodnjo.
- **Finančne spodbude za razvoj vodikovih tehnologij:** EU vlaga več milijard evrov v raziskave in razvoj naprednih elektrolizatorjev, optimizacijo proizvodnje in širitev infrastrukture.
- **Vzpostavitev čezmejnih vodikovih omrežij:** Poudarek je na razvoju vodikovih dolin ter povezovanju evropskih držav v skupno vodikovo omrežje.

- **Krepitev uvoza vodika iz tretjih držav:** EU razvija partnerstva s proizvajalci vodika iz Severne Afrike in Bližnjega vzhoda ter spodbuja uvoz preko posebnih energetske koridorjev.

Za dosego teh ciljev je predvidenih skupno 300 milijard evrov naložb, ki bodo financirane iz različnih virov:

- 225 milijard evrov bo zagotovljenih iz posojil v okviru Mehanizma za okrevanje in odpornost (RRF), ki je osrednji del svežnja NextGenerationEU.
- 20 milijard evrov bo pridobljenih z dražbo emisijskih kuponov iz rezerve za stabilnost trga v okviru sistema EU za trgovanje z emisijami (ETS).
- 26,9 milijarde evrov bo preusmerjenih iz skladov kohezijske politike, če bodo ti podpirali cilje načrta REPowerEU.
- 7,5 milijarde evrov bo preusmerjenih iz Evropskega kmetijskega sklada za razvoj podeželja za projekte, skladne s cilji REPowerEU.
- 3 milijarde evrov bo prispeval Sklad za inovacije za podporo naprednim tehnologijam in inovacijam na področju čiste energije.

Preostala sredstva bodo zagotovljena iz nacionalnih virov, Evropske investicijske banke (EIB), zasebnih naložb in davčnih reform. Ta celoviti finančni okvir bo omogočil izvedbo ključnih reform in naložb za dosego energetske neodvisnosti in trajnostne prihodnosti Evrope.

Kljub tem ambicioznim načrtom ostaja odprtih več vprašanj, predvsem glede ekonomske vzdržnosti, tehnoloških izzivov ter infrastrukture za shranjevanje in distribucijo vodika. Prav tako se zastavlja vprašanje, kako bo EU zagotovila zadostne količine električne energije iz OVE za proizvodnjo zelenega vodika, saj bo za dosego teh ciljev potrebna občutna širitev obnovljivih virov energije (European Commission, 2022).

6.2.2 Evropska vodikova banka kot finančni instrument

Da bi spodbudila trg obnovljivega vodika in znižala stroške njegove proizvodnje, je Evropska komisija leta 2023 ustanovila Evropsko vodikovo banko. Ta institucija igra ključno vlogo pri financiranju vodikovih projektov in zagotavljanju stabilnega poslovnega okolja za vlagatelje. Njena glavna naloga je finančna podpora proizvodnje in distribucije vodika, predvsem preko mehanizmov cenovnih premij in neposrednih subvencij.

Evropska vodikova banka deluje na principu dražb, kjer lahko proizvajalci pridobijo finančno podporo za proizvodnjo vodika. Dražba, izvedena decembra 2024, ima skupni proračun 1,2 milijarde evrov, pri čemer se lahko proizvajalci potegujejo za premijo s fiksno ceno do 4 evre na kilogram proizvedenega vodika za obdobje 10 let. Dražba vključuje tudi posebno pomorsko košarico v višini 200 milijonov evrov, ki je namenjena razvoju vodikove infrastrukture za pomorski sektor.

Poleg sredstev EU nekatere države članice dodatno financirajo projekte v okviru modela Auction-as-a-Service (AaaS). Avstrija, Španija in Litva so napovedale več kot 1 milijardo evrov dodatnih sredstev, kar skupni proračun banke zvišuje na skoraj 2 milijardi evrov.

Kljub pozitivnim vidikom banke pa ostajajo izzivi, kot so:

- **Nejasna dolgoročna strategija financiranja:** Trenutno ni zagotovil, da bodo dražbe potekale redno ali da bo financiranje ostalo stabilno po letu 2030.
- **Nezadostna vlaganja v infrastrukturo:** Finančna podpora je osredotočena na proizvodnjo, manj pa na izgradnjo transportnih in skladiščnih zmogljivosti.
- **Pomanjkanje enotnih standardov za uvoz vodika:** Države članice imajo različne pristope k regulaciji in certifikaciji obnovljivega vodika.

Kljub tem izzivom je Evropska vodikova banka pomemben korak k vzpostavitvi stabilnega trga za obnovljivi vodik v EU in konkurenčnosti Evrope v svetovnem vodikovem sektorju (Hydrogen Europe, 2024).

6.2.3 Opozorilo Evropskega računskega sodišča

Kljub ambicioznim ciljem REPowerEU in finančnimi mehanizmi je Evropsko računsko sodišče v poročilu iz leta 2024 opozorilo, da EU verjetno ne bo dosegla načrtovanih ciljev za proizvodnjo in uvoz obnovljivega vodika do leta 2030. Glavni razlogi za to so strukturne ovire, visoki stroški in počasna izvedba projektov.

Glavne ugotovitve poročila so:

1. **Zamude pri vzpostavitvi infrastrukturnih projektov:** Številni projekti, ki so ključni za proizvodnjo in transport vodika, niso pravočasno implementirani.

2. **Visoki stroški proizvodnje in distribucije vodika:** Kljub finančnim podporam cena obnovljivega vodika še vedno ni konkurenčna v primerjavi z zemeljskim plinom.
3. **Pomanjkanje enotne zakonodaje:** Nekatere države članice niso prilagodile nacionalnih regulativ za hitrejše uvajanje vodikovih tehnologij.
4. **Nizka raven zasebnih investicij:** Zaradi negotovosti glede dolgoročnih politik in nestabilnosti financiranja zasebni vlagatelji oklevajo pri vlaganju v vodikove projekte.

Poleg teh težav poročilo izpostavlja tudi tveganje neučinkovite porabe javnih sredstev. V nekaterih primerih ni jasno, ali bodo dodeljena sredstva dejansko pripomogla k povečanju proizvodnje vodika ali pa bodo namenjena projektom z omejenim dolgoročnim vplivom.

Evropsko računsko sodišče priporoča:

- Boljše načrtovanje in nadzor nad investicijami.
- Okrepljeno sodelovanje med državami članicami pri razvoju enotnega vodikovega trga.
- Večjo transparentnost pri porabi javnih sredstev in strožje regulativne smernice za zagotavljanje učinkovite uporabe sredstev.

To opozorilo kaže, da bo uspeh evropske vodikove strategije odvisen od politične volje, sposobnosti privabljanja zasebnega kapitala ter večje usklajenosti med državami članicami (European Court of Auditors, 2024).

6.2.4 Sprejemljivost vodikovih tehnologij v družbi

Projekt Hyacinth, financiran s strani skupnega podjetja za gorivne celice in vodik (FCH 2 JU), je bil zasnovan z namenom oceniti raven ozaveščenosti, razumevanja in sprejemljivosti vodikovih gorivnih celic (HFC) v širši družbi v različnih evropskih državah. Raziskava, izvedena med letoma 2015 in 2016, je vključevala približno 1000 odraslih iz vsake sodelujoče države: Belgije, Francije, Nemčije, Norveške, Slovenije, Španije in Velike Britanije. Vzorci so bili reprezentativni glede na starost, spol, regijo in izobrazbo.

Ključne ugotovitve raziskave so:

- **Splošna ozaveščenost o HFC-tehnologijah:** Več kot 40 % anketirancev je že slišalo za HFC-tehnologije v kontekstu proizvodnje energije. Najvišja ozaveščenost je bila zaznana v

Nemčiji in na Norveškem (50 %), najnižja pa v Španiji (29 %). Le 6 % anketirancev je menilo, da tehnologijo dobro poznajo.

- **Mnenje o HFC kot rešitvi za energetske izzive:** Skoraj 57 % anketirancev je ocenilo HFC kot dobro ali zelo dobro rešitev za energetske izzive.
- **Poznavanje stanovanjskih gorivnocičnih enot (mSPTE):** Le 25 % anketirancev je slišalo za mSPTE, pri čemer je bila ozaveščenost najvišja v Nemčiji (32 %) in najnižja na Norveškem (20 %).
- **Čustveni odziv na mSPTE:** Več kot 60 % anketirancev je izrazilo zanimanje za to tehnologijo, 54 % jih je navdalo upanje, 15 % je izrazilo zaskrbljenost, 11 % pa odpor.
- **Sprejemljivost mSPTE:** Približno 60 % anketirancev je mSPTE ocenilo kot dober ali zelo dober sistem za proizvodnjo elektrike in ogrevanje. Najvišja sprejemljivost je bila v Nemčiji, Španiji in Sloveniji (71 %), najnižja pa v Franciji (55 %).
- **Podpora javnemu financiranju:** Več kot 70 % anketirancev podpira subvencioniranje domačih HFC.
- **Poznavanje električnih vozil na vodikove gorivne celice (FCEV):** Za FCEV je slišalo 45 % anketirancev, 15 % pa jih je imelo nekaj znanja o teh vozilih. Najvišja ozaveščenost je bila na Norveškem in v Nemčiji.
- **Sprejemljivost FCEV:** Anketiranci so bili bolj naklonjeni FCEV kot konvencionalnim vozilom ter vozilom na stisnjen ali utekočinjen zemeljski plin, vendar so prednost dali baterijskim električnim vozilom.
- **Podpora za avtobuse na vodikove gorivne celice:** Skoraj 80 % anketirancev bi raje zamenjalo konvencionalne avtobuse z avtobusi na vodikove gorivne celice.

Raziskava je pokazala, da na družbeno sprejemljivost HFC-aplikacij vplivajo dejavniki, kot so seznanjenost s tehnologijo, čustveni odzivi, zaznane koristi in stroški ter preferenca do alternativnih tehnologij. Za uspešno uvedbo HFC-tehnologij je ključnega pomena povečati ozaveščenost javnosti, zagotoviti transparentno komunikacijo ter vključiti skupnost v proces odločanja (Energetika, 2017).

7 SKLEP

Tekom pisanja diplomskega dela sem raziskoval ključne vidike trajnostnega prehoda na vodik, kjer so bili obravnavani izzivi povezani z uporabo tega energenta prihodnosti. S poudarkom na zmanjševanju emisij toplogrednih plinov, prilagoditvah infrastrukture in doseganju podnebnih ciljev je bilo delo usmerjeno v razumevanje, kako tehnološki in politični ukrepi podpirajo trajnostno energetske tranzicijo. V svojem sklepu lahko poudarim, da vodik kot energent prihodnosti igra ključno vlogo pri trajnostnem prehodu v energetske sistem. Z njegovo uporabo je mogoče znatno zmanjšati emisije toplogrednih plinov in prilagoditi obstoječo infrastrukturo za doseganje globalnih podnebnih ciljev. Ob tem sem ugotovil, da tehnološki in politični ukrepi zahtevajo usklajeno delovanje, ki zagotavlja trajnostno energetske tranzicijo ob hkratnem varovanju okolja in spodbujanju družbene blaginje.

Diplomska naloga temelji na štirih hipotezah, ki so bile zasnovane z namenom analize trajnostnih in tehničnih vidikov prehoda na vodik:

- **(H1) – Prehod na vodik kot alternativni vir energije bo bistveno prispeval k zmanjšanju emisij toplogrednih plinov do 80 % in izboljšanju kakovosti zraka v urbanem okolju do 30 %.**

Analiza v nalogi potrjuje, da ima prehod na vodik kot energent velik potencial za zmanjšanje emisij toplogrednih plinov. Zlasti uporaba zelenega vodika omogoča popolno odpravo emisij ogljikovega dioksida. Študije kažejo, da lahko zamenjava fosilnih goriv z vodikom v prometu in industriji zmanjša emisije ogljikovega dioksida za 85,7 %, kar je v skladu s predpostavko hipoteze, zato lahko ta del potrdimo. Uporaba vodika kot energenta ne proizvaja trdnih delcev (PM_{2.5}) in znatno zmanjšuje emisije dušikovih oksidov, kar pozitivno vpliva na kakovost zraka. Vendar so natančne študije, ki bi kvantificirale izboljšanje kakovosti zraka za točno določen odstotek, omejene. Zato lahko ta del hipoteze samo delno potrdimo, saj obstaja potencial za izboljšanje kakovosti zraka, vendar brez natančne kvantifikacije.

- **(H2) – Trenutna infrastruktura plinovodov ni popolnoma pripravljena za prehod na vodik brez obsežnih tehničnih nadgradenj in prilagoditev kompresorskih in regulacijskih postaj.**

Analiza je pokazala, da lahko obstoječe kompresorske in regulacijske postaje delujejo brez večjih prilagoditev pri mešanicah z do 10 % vodika. Kljub temu prehod na 100-odstotni vodik zahteva obsežne nadgradnje. Pri kompresorskih postajah je zaradi nižje gostote vodika potrebna

večja kompresijska moč, kar pomeni potrebo po dodatnih kompresorskih postajah in nadgradnjo obstoječih turbokompresorjev. Razvoj optimiziranih turbokompresorjev je še v teku, saj trenutni modeli niso prilagojeni za učinkovito delo s čistim vodikom. Študija o regulacijskih postajah je pokazala, da trenutni regulatorji tlaka in varnostni ventili delujejo z vodikom, vendar njihova dolgotrajna zanesljivost še ni potrjena. Za uporabo 100-odstotnega vodika bodo potrebne prilagoditve tesnil in ventilov, saj vodik lažje prodira skozi materiale in povzroča večjo obrabo. Hipotezo lahko potrdimo.

- **(H3) – Vključitev vodika v obstoječe plinovodne sisteme zahteva razvoj novih tehničnih smernic, ki bodo zagotavljale varnost in učinkovitost omrežja, pri čemer je potrebno razviti smernice na področju materialov, tlačne opreme, zaznavanja uhajanja, zaščite pred korozijo in transportnih postopkov.**

Diplomsko delo poudarja, da trenutni tehnični standardi in smernice v plinovodnem sektorju večinoma temeljijo na prenosu zemeljskega plina. Vodik prinaša specifične tehnične izzive, ki jih obstoječi predpisi ne zajemajo v celoti, kar pa zahteva razvoj novih smernic. Ker ugotovitve potrjujejo potrebo po novih smernicah, lahko hipotezo potrdimo.

- **(H4) – Dolgoročna trajnost prehoda na vodik bo odvisna od ekonomske izvedljivosti, politične podpore in družbene sprejemljivosti tehnologije.**

Diplomsko delo analizira ekonomske, politične in družbene dejavnike, ki vplivajo na prehod na vodik. Kljub obetavnim tehnologijam je ekonomska izvedljivost še vedno velik izziv zaradi visokih stroškov proizvodnje in potrebnih infrastrukturnih prilagoditev. Politična podpora je ključnega pomena, saj brez ustreznih subvencij in spodbud trg z vodikom ne bo konkurenčen. Prav tako ima pomembno vlogo družbena sprejemljivost, ki je odvisna od ozaveščenosti javnosti in percepcije varnosti vodika. Ker vse te spremenljivke vplivajo na dolgoročni uspeh, lahko hipotezo potrdimo.

Sklepno lahko trdimo, da je trajnostni prehod na vodik tehnično izvedljiv, vendar zahteva širši pristop, ki združuje tehnološke, ekonomske in politične strategije. Diplomaska naloga tako prispeva k razumevanju kompleksnosti prehoda na vodik ter osvetljuje ključne izzive in priložnosti, ki jih ta proces prinaša.

8 VIRI

- Amanatidis, G., & Petit, A. (aprila 2024). *Evropski parlament*. Pridobljeno iz <https://www.europarl.europa.eu/>:
<https://www.europarl.europa.eu/factsheets/sl/sheet/72/boj-proti-podnebnim-spremembam>
- Bavdaž, M. V. (decembra 2018). *B&B izobraževalni center*. Pridobljeno iz <https://bb.si/>:
https://bb.si/f/docs/diplomska-dela/bavdaz_mitja_vladimir-diplomska_naloga.pdf
- Bele, M. (18. decembra 2020). *Prispevki za novejšo zgodovino*. Pridobljeno iz <https://ojs.inz.si/pnz/index>: <https://ojs.inz.si/pnz/article/view/2611/4209>
- Cimmex*. (2023). Pridobljeno iz <https://cimmex.si/>: <https://cimmex.si/prodajni-program/vodovodni-material/elektrovarilni-material/>
- Commission, E. T. (marca 2023). *Energy Transitions Commission*. Pridobljeno iz <https://www.energy-transitions.org/>: https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2023/04/2022-053-ETC-Hydrogen-Technical-Annex-Final_.pdf
- Energetika*. (8. maja 2017). Pridobljeno iz <https://www.energetika.net/si/novice/clanki/druzbenasprejemljivostvodikovih-tehnologij-projekt-hyacint>
- European Commission*. (18. maja 2022). Pridobljeno iz <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0230>
- European Court of Auditors*. (2024). Pridobljeno iz <https://www.eca.europa.eu/sl/news/NEWS-SR-2024-11>
- Evropski parlament*. (19. maja 2021). Pridobljeno iz <https://www.europarl.europa.eu/>:
https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2021-0241_SL.html
- Haili Pipe*. (2022). Pridobljeno iz <https://www.hailigd.com/>: https://www.hailigd.com/2--4-6--8--HDPE-gas-pipe-specifications_117.html
- Hawle*. (2024). Pridobljeno iz <https://www.hawle.com/>:
<https://www.hawle.com/en/products/gate-valves/e3-gate-valve-for-gas-pe-ends-pn-10-4055e3~p18667>

- Hydrogen Europe*. (2024). Pridobljeno iz <https://hydrogeneurope.eu/second-european-hydrogen-bank-auction-and-innovation-fund-call-2024-launched/>
- HyUnder. (junija 2015). Pridobljeno iz [https://www.sciencedirect.com/:
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215014290](https://www.sciencedirect.com/:https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215014290)
- Laboratorij za regulacijsko tehniko in močnostno elektroniko*. (2012/2013). Pridobljeno iz [https://lrtme.fe.uni-lj.si: https://lrtme.fe.uni-lj.si/lrtme/slo/mate_tehn/Vodik_proizv_sklad.pdf](https://lrtme.fe.uni-lj.si:https://lrtme.fe.uni-lj.si/lrtme/slo/mate_tehn/Vodik_proizv_sklad.pdf)
- Levovnik, D. (julija 2010). Pridobljeno iz [https://fundacija-avgustakuharja.si:
https://fundacija-avgustakuharja.si/wp-content/uploads/2020/10/2010-diploma-David-Levovnik.pdf](https://fundacija-avgustakuharja.si:https://fundacija-avgustakuharja.si/wp-content/uploads/2020/10/2010-diploma-David-Levovnik.pdf)
- MDPI. (13. maja 2022). *MDPI*. Pridobljeno iz [https://www.mdpi.com/:
https://www.mdpi.com/1996-1073/15/10/3582](https://www.mdpi.com/:https://www.mdpi.com/1996-1073/15/10/3582)
- MTC. (2025). Pridobljeno iz [https://mtcsolutions.com/:
https://mtcsolutions.com/resources/tech-blogs/a-comprehensive-overview-of-environmental-hydrogen-embrittlement/](https://mtcsolutions.com/:https://mtcsolutions.com/resources/tech-blogs/a-comprehensive-overview-of-environmental-hydrogen-embrittlement/)
- Novak, L. (septembra 2022). Pridobljeno iz [https://repozitorij.uni-lj.si/: https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=140194&lang=slv](https://repozitorij.uni-lj.si/:https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=140194&lang=slv)
- Nowega GmbH. (2020). <https://www.nowega.de/>. Pridobljeno iz <https://www.nowega.de/wp-content/uploads/200915-whitepaper-h2-infrastructure-EN.pdf>
- NREL. (oktobra 2022). *NREL*. Pridobljeno iz [www.nrel.gov:
https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/81704.pdf?trk=public_post_comment-text](http://www.nrel.gov:https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/81704.pdf?trk=public_post_comment-text)
- Pannonia BioGas*. (2025). Pridobljeno iz [https://pannoniabiogas.azurewebsites.net/:
https://pannoniabiogas.azurewebsites.net/sl/biometan/](https://pannoniabiogas.azurewebsites.net/:https://pannoniabiogas.azurewebsites.net/sl/biometan/)
- Plin. (2020). *Plin*, 12–19.
- Plin. (2021). Pregled dela evropskega tehničnega odbora. *Plin*, 74–82.
- Plin. (2023). *Plin*, 76–78.
- Plin. (2021). Testing of a Gas Pressure. *Plin*, 28.
- Plinarna Maribor*. (20. januarja 2021). Pridobljeno iz [https://www.plinarna-maribor.si:
https://www.plinarna-maribor.si/wp-content/uploads/Varnostni-list-zemeljski-plin.pdf](https://www.plinarna-maribor.si:https://www.plinarna-maribor.si/wp-content/uploads/Varnostni-list-zemeljski-plin.pdf)

- Plinovodi*. (2024). Pridobljeno iz <https://www.plinovodi.si/>:
<https://www.plinovodi.si/sl/prenosni-sistem/okolje-in-varnost/o-zemeljskem-plinu/>
- Plinovodi*. (2024). Pridobljeno iz <https://www.plinovodi.si/>:
<https://www.plinovodi.si/sl/vodik/>
- Polix*. (2024). Pridobljeno iz <https://www.polix.si/>:
<https://www.polix.si/sl/proizvodi/krogelne-pipe-za-plin,-nafto-in-naftne-derivate/krogelna-pipa-kpv-g,-prehodni-kos-jeklo-polietilen-podzemna-vgradnja-pn10-dy-vx-px-pg0-detail.html>
- Puhui Industry Co.,Ltd.* (2024). Pridobljeno iz <https://www.phhdpepipe.com/>:
<https://www.phhdpepipe.com/hdpe-gas-pipe.html>
- Siestma, J. (2021). Testing of a Gas Pressure. *Plin.*, 26–31.
- Steel pipe China*. (2024). Pridobljeno iz <http://vi.china-steelpipes.com/>: <http://vi.china-steelpipes.com/high-quality-astm-a53-steel-pipe-product/>
- Tehnološki inštitut Massachusettsa*. (16. decembra 2019). Pridobljeno iz
<https://news.mit.edu/>: <https://news.mit.edu/2019/role-natural-gas-transition-electricity-1216>
- University of California. (8. oktobra 2009). *eScholarship*. Pridobljeno iz
<https://escholarship.org/>: <https://escholarship.org/uc/item/4vm4k8dz>
- Uranjek, S. (maja 2016). Pridobljeno iz <https://core.ac.uk/download/pdf/67605589.pdf>
- Uranjek, S. (maja 2016). Problematika vzdrževanja plinovodnih sistemov. Maribor, Slovenija.