

# Napuštanje cjevovoda i prenamjena za transport vodika

---

**Mazić, Leonardo**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:875880>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-11**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

**NAPUŠTANJE CJEVOVODA I PRENAMJENA ZA TRANSPORT  
VODIKA**

Diplomski rad

Leonardo Mazić

N350

Zagreb, 2022.

NAPUŠTANJE CJEVOVODA I PRENAMJENA ZA TRANSPORT VODIKA  
LEONARDO MAZIĆ

Završni rad je izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Kada prihodi ostvareni radom naftovoda i plinovoda nisu dovoljni za pokrivanje operativnih troškova razmišlja se o njihovoj prenamjeni ili napuštanju. Ako su cjevovodi ozbiljno oštećeni ili operativni rizik prelazi dozvoljenu granicu, uslijed čega može doći do ozbiljnih sigurnosnih i ekoloških incidenata uzduž trase cjevovoda, potrebno je pristupiti napuštanju i odgovornom zbrinjavanju dijelova cjevovoda. U slučaju da se nakon kontrole stanja cjevovoda utvrdi mogućnost njegovog daljnjeg korištenja može se pristupiti i prenamjeni postojećih cjevovoda kako bi se njima transportirali neki drugi fluidi. Jedna od mogućnosti korištenja postojećih cjevovoda je i transport ugljikovog dioksida u okviru projekata njegovog zbrinjavanja kao i transport čistog vodika ili njegove mješavine s prirodnim plinom. Zbog još uvijek velikih troškova proizvodnje vodika, prenamjena i korištenje postojećih cjevovoda odnosno plinovoda za njegov transport predstavlja prihvatljivu opciju smanjenja cijene projekta korištenja vodika.

Ključne riječi: transport vodika, prenamjena cjevovoda, napuštanje cjevovoda

Završni rad sadrži: 46 stranica, 11 slika, 3 tablice i 23 reference.

Jezik izvornika: Hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta  
Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Katarina Simon, redovita profesorica RGNf-a

Komentor: Dr. sc. Katarina Žbulj

Ocjenjivači: Dr. sc. Katarina Simon, redovita profesorica RGNf-a

Dr. sc. Vladislav Brkić, izvanredni profesor RGNf-a

Dr. sc. Borivoje Pašić, izvanredni profesor RGNf-a

Datum obrane: 17.02.2022., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

PIPELINE ABANDONMENT AND CONVERSION FOR HYDROGEN  
TRANSPORTATION  
LEONARDO MAZIĆ

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Oil and Gas Engineering and Energy  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

When revenue generated from the operation of oil and gas pipelines becomes insufficient to cover operating costs, consideration is given to their conversion or abandonment. If pipelines are severely damaged or the operational risk exceeds the permitted limit, which may result in serious safety and environmental incidents along the pipeline route, it is necessary to initiate their abandonment and responsible disposal of pipeline parts. Occasionally, the already existing pipelines may be converted and further used for the transportation of other fluids.

One of the possibilities of using existing pipelines is the transportation of carbon dioxide within the framework of its disposal projects as well as the transport of pure hydrogen or its mixture with natural gas. Due to the still high cost of hydrogen production, the conversion and use of the existing pipelines for hydrogen transportation represents an acceptable option to reduce the price of the hydrogen-based project.

Keywords: hydrogen transportation, pipeline conversion, pipeline abandonment, hydrogen pipelines

Thesis contains: 46 pages, 11 figures, 3 tables and 23 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited at: The Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Supervisor: Professor Katarina Simon, PhD

Cosupervisor: Katarina Žbulj, PhD

Reviewers: Professor Katarina Simon, PhD

Associate Professor Vladislav Brkić, PhD

Associate Professor Borivoje Pašić, PhD

Date of defense: February 17th, 2022, at the Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

## **SADRŽAJ**

<b>I POPIS SLIKA .....</b>	<b>I</b>
<b>II POPIS TABLICA .....</b>	<b>II</b>
<b>III POPIS KORIŠTENIH KRATICA .....</b>	<b>III</b>
<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. NAPUŠTANJE CJEVOVODA .....</b>	<b>3</b>
2.1. Procedura napuštanja cjevovoda i pridruženih objekata .....	5
2.2. Nadzor nakon napuštanja cjevovoda .....	11
<b>3. VODIK I NJEGOVA SVOJSTVA.....</b>	<b>15</b>
<b>4. NAČINI TRANSPORTA VODIKA .....</b>	<b>21</b>
4.1. Transport vodika cestom i željeznicom.....	21
4.2. Transport vodika brodovima .....	23
4.3. Transport vodika cjevovodima .....	26
<b>5. PRENAMJENA POSTOJEĆIH PLINOVODA I NAFTOVODA U CJEVOVODE ZA TRANSPORT VODIKA .....</b>	<b>29</b>
<b>6. PRIMJER ANALIZE PRENAMJENE INFRASTRUKTURNE MREŽE PLINOVODA ZA TRANSPORT VODIKA U NJEMAČKOJ .....</b>	<b>36</b>
<b>7. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>42</b>
<b>8. POPIS LITERATURE.....</b>	<b>44</b>

## I POPIS SLIKA

<b>Slika 3-1.</b> Usporedba gustoće nekih plinova.....	16
<b>Slika 3-2.</b> Usporedba donjih ogrjevnih vrijednosti nekih plinova .....	16
<b>Slika 3-3.</b> Usporedba donjih i gornjih granica eksplozivnosti .....	18
<b>Slika 4-1.</b> Kamion za transport vodika u plinovitom stanju .....	22
<b>Slika 4-2.</b> Kamion za transport tekućeg vodika .....	23
<b>Slika 4-3.</b> „Suiso Feontier“, brod za transport tekućeg vodika .....	25
<b>Slika 4-4.</b> Rudnik lignita, Loy Yang, Viktorija, Australija.....	26
<b>Slika 4-5.</b> Shema HESC projekta .....	26
<b>Slika 5-1.</b> Mreža plinovoda u SAD-u s prikazanim interkonekcijama s Kanadom i Meksikom te podzemnim skladištima plina .....	31
<b>Slika 5-2.</b> „European Hydrogen Backbone“ .....	32
<b>Slika 6-1.</b> Scenariji dostupnosti plinovoda za prenamjenu za 2030. godinu .....	40

## II POPIS TABLICA

<b>Tablica 5-1.</b> Deset najduljih mreža plinovoda u svijetu .....	30
<b>Tablica 6-1.</b> Prednosti i nedostaci pojedinih opcija prenamjene plinovoda .....	37
<b>Tablica 6-2.</b> Klasifikacija plinovoda pogodnih za prenamjenu .....	38

### III POPIS KORIŠTENIH KRATICA

CAPEX – kapitalni troškovi (engl. *CAPital EXpenditure*)

CO – ugljikov monoksid (engl. *Carbon monoxide*)

CO<sub>2</sub> – ugljikov dioksid (engl. *Carbon dioxide*)

lp/kWh – lipe po kilovat-satu

DGE – donja granica eksplozivnosti

EHS – elektrokemijska separacija vodika (engl. *Electrochemical Hydrogen Separation*)

EU – Europska Unija (engl. *European Union*)

GGE – gornja granica eksplozivnosti

H<sub>2</sub> – vodik (engl. *Hydrogen*)

HDPE - polietilen visoke gustoće (engl. *High Density PolyEthylene*)

HESC – Energetski lanac opskrbe vodikom (engl. *Hydrogen Energy Supply Chain*)

HySTRA – Udruga za tehnološki razvoj energetskog lanca opskrbe vodikom (engl. *Hydrogen Energy Supply-chain Technology Research Association*)

LNG – ukapljeni prirodni plin (engl. *Liquefied natural gas*)

O<sub>2</sub> – kisik (engl. *Oxigen*)

OPEX – operativni troškovi (engl. *OPerating EXpenses*)

PSA – adsorpcija promjenom tlaka (engl. *Pressure Swing Adsorption*)

PVC - polivinil klorid (engl. *PolyVinyl Chloride*)

SAD – Sjedinjene Američke Države

SO<sub>2</sub> – sumporov dioksid (engl. *Sulfur dioxide*)

X60 – kvaliteta čelika s granicom elastičnosti od 60 200 psi ili 415 MPa

X70 – kvaliteta čelika s granicom elastičnosti od 70 300 psi ili 485 MPa



## 1. UVOD

Cjevovodi primarno služe za prijenos pridobivenih ugljikovodika od bušotina do mjesta obrade na mjernoj/sabirnoj stanici odnosno centralnoj plinskoj stanici te za prijenos obrađenog fluida, cjevovodima većih promjera, do krajnjih korisnika. Cjevovodi imaju određeni radni vijek, koji će se smanjivati ovisno o vrsti i ozbiljnosti oštećenja tijekom godina korištenja. Jednom kada se dosegnu uvjeti u kojima više nije sigurno koristiti cjevovod nužno je prekinuti sve operacije i staviti cjevovod izvan uporabe (engl. *pipeline decommissioning*) te pristupiti procesu napuštanja cjevovoda (engl. *pipeline abandonment*). Razlika između stavljanja cjevovoda izvan uporabe i njegovog napuštanja je u tome što se kod napuštanja nakon uklanjanja fluida koji se transportirao, čišćenja unutrašnjosti te čepljenja krajnjih dijelova cjevovoda, moraju prekinuti sve veze s postojećim aktivnim cjevovodima i priključenim objektima. U opisanom slučaju, kompletna usluga transporta prestaje, ne postoje novi cjevovodi kojima se izvršava usluga niti se ona obavlja putem drugih aktivnih cjevovoda u sustavu (Canada Energy Regulator, 2021). Za razliku od napuštanja cjevovoda, stavljanje cjevovoda izvan uporabe podrazumijeva ostavljanje cjevovoda u stanju da ga se nakon određenog vremena može koristiti za transport nekih drugih fluida odnosno prenamijeniti.

Primarne opasnosti koje se vežu uz napuštanje cjevovoda povezane su s dugoročnim razaranjem cijevi uslijed korozije, potencijalnim stvaranjem umjetnih kanala za protjecanje vode (engl. *water conduits*), utjecajem na okoliš te s mogućnošću urušavanja cjevovoda i s tim povezanog slijeganja tla (Prewitt et al., 2017).

Broj operativnih naftovoda i plinovoda u svijetu, isključujući cjevovode koji se nalaze na eksploatacijskim poljima, premašio je 3 800, a njihova ukupna duljina veća je od  $196 \times 10^4$  km (Jing et al., 2021). Među njima postoje cjevovodi koji su u uporabi dugi niz godina i kod kojih su povećani učestalost nesreća i operativni rizik. Posljedično, da bi se osigurao nesmetani rad takvih cjevovoda potrebna su veća ulaganja s ciljem održavanja i popravka cjevovoda, što u konačnici rezultira većim troškovima održavanja cjevovoda od profita ostvarenog radom cjevovoda i ubrzava odluku o napuštanju takvog cjevovoda (Jing et al., 2021).

Razlozi za napuštanje cjevovoda mogu biti sljedeći:

1. Napuštanje kada se dio ili cijeli cjevovod više ne namjeravaju koristiti;
2. Napuštanje zbog smanjenja količine fluida koja se transportira cjevovodom;
3. Napuštanje zbog sigurnosnih razloga uslijed prevelikih oštećenja;
4. Napuštanje zbog starosti cjevovoda, ali samo u slučaju kada održavanje nije ekonomski isplativo.

Kada se dosegne kraj radnog vijeka cjevovoda postoje dvije opcije za napuštanje: fizičko uklanjanje cjevovoda s lokacije ili napuštanje cjevovoda koji ostaje na lokaciji, pravilno osiguran i zapečaćen, tzv. in-situ napuštanje cjevovoda. Također, ovisno o lokaciji na kojoj se cjevovodi nalaze, napuštanje se dijeli na napuštanje cjevovoda na kopnu - “onshore” napuštanje i na napuštanje cjevovoda na moru - “offshore” napuštanje. Postupci napuštanja cjevovoda na kopnu i na moru su slični, no često je napuštanje na kopnu manje zahtjevno i jeftinije od napuštanja na moru (NiGen International, 2021).

Veliki problem kod napuštanja cjevovoda je taj što na globalnoj razini ne postoje opće smjernice, pravila ili zakoni za napuštanje naftovoda i plinovoda. Razvijene zemlje, poput Sjedinjenih Američkih Država i Kanade, koje imaju veliki broj cjevovoda starijih od pedeset godina, ali i bogato iskustvo u njihovom napuštanju, objavile su dokumente i specifikacije za pravilno napuštanje, te čišćenje i zbrinjavanje zastarjelih naftovoda i plinovoda. Nasuprot tome, mnogo država nema razvijena ujednačena pravila za postupak napuštanja naftovoda i plinovoda, a tehnički standardi koji postoje, a odnose se na njihovo čišćenje i napuštanje, nisu sveobuhvatni.

Osim trajnog napuštanja plinovoda i naftovoda, kada postoje uvjeti za to, oni se mogu privremeno napustiti i prenamijeniti u cjevovode za transport drugih fluida. U ovom radu će se razmatati opcija prenamjene postojećih plinovoda za transport vodika.

## 2. NAPUŠTANJE CJEVOVODA

Postupak napuštanja cjevovoda provodi se u tri faze od kojih prva podrazumijeva planiranje napuštanja i može nastupiti bilo kada tijekom operativnog vijeka cjevovoda. Izrazito je bitno da se s fazom planiranja krene što je prije moguće. Obzirom da se faza planiranja napuštanja cjevovoda odvija najčešće nekoliko godina prije samog napuštanja, bitno je neposredno prije početka napuštanja još jednom provjeriti valjanost cijelog isplaniranog postupka. Razlog tome su neočekivane promjene koje su se mogle dogoditi u periodu od tih nekoliko godina koliko je prošlo od izrade plana do trenutka početka njegove realizacije, kao npr. razvoj ruralnih ili urbanih sredina na mjestima gdje se to u vrijeme početka planiranja nije očekivalo. Druga faza podrazumijeva provođenje samog postupka napuštanja cjevovoda, a može uključivati prikupljanje raznih odobrenja, sporazuma te dekonstrukciju i fizičko uklanjanje cjevovoda. Posljednja faza je faza nadgledanja nakon napuštanja cjevovoda gdje se sva imovina koja se ostavi na lokaciji nakon napuštanja mora periodično nadgledati od za to odgovorne pravne osobe, zbog sigurnosnih razloga i moguće potrebe za budućom obnovom te vraćanja u funkciju napuštene imovine (Revie, 2015).

Postoje dvije opcije kada je riječ o napuštanju cjevovoda. Cjevovodi se mogu u potpunosti fizički ukloniti s lokacije ili ih se zbog određenih razloga može ostaviti na lokaciji ukoliko su odvojeni od svih ostalih aktivnih vodova i objekata. Potpuno uklanjanje cjevovoda je financijski nepovoljna opcija jer njezini troškovi mogu biti jednaki troškovima instalacije potpuno novog cjevovoda. Osim toga može negativno utjecati na kvalitetu tla zbog miješanja tla. Međutim, postoje slučajevi u kojima je potrebno potpuno uklanjanje cjevovoda, kao što su: trasa kojom prolazi postojeći stari cjevovod preklapa se s trasom kojom bi trebao prolaziti novi cjevovod (engl. *right-of-way*); buduće korištenje zemljišta zahtijeva uklanjanje cjevovoda (npr. poljoprivredne aktivnosti); plan razvoja zemljišta zahtijeva iskopavanje tla (npr. izgradnja podzemne garaže) ili vlasnik cjevovoda ne želi preuzeti odgovornost ukoliko bi u budućnosti došlo do neplaniranog oštećenja cjevovoda i zagađenja okoliša.

Ukoliko je cjevovod dovoljno malog promjera i duljine može se ukloniti relativno jednostavno, povlačenjem iz zemlje ili ispod vodene površine. U svim ostalim situacijama nužna su velika otkopavanja zemljanog pokrova kako bi se cjevovod u potpunosti uklonio. Kako ne bi došlo do narušavanja prirodnog staništa koje se nalazi u okolini cjevovoda koji se iskapa,

potrebne su posebne mjere opreza ili ako je neophodno, cjevovod se može ostaviti na lokaciji uz odgovarajuće mjere zaštite kao što su čišćenje cjevovoda, punjenje inertnim materijalima ili inertnim plinom te na kraju čepljenjem krajeva cjevovoda.

Jednom kada se cjevovod trajno napusti, uklanja se i katodna zaštita te više ne postoji mogućnost očuvanja strukturne cjelovitosti cjevovoda. Uobičajeni problemi vlasnika zemljišta na kojem se nalazi napušteni cjevovod su sljedeći (Revie, 2015):

1. postojanje cjevovoda može ometati buduće razvojne planove;
2. cjevovod se tijekom godina može pojaviti na površini ili ometati poljoprivredne aktivnosti;
3. cjevovod može ometati odvodnju tako što postaje umjetni kanal za protjecanje i nakupljanje vode;
4. može doći do urušavanja cjevovoda i oštećenja zemljišta, infrastrukture ili poljoprivredne opreme koja se nalazi na njemu i
5. naknadno zagađenje okoliša iz cjevovoda i s tim povezanih troškova uklanjanja cjevovoda.

Kao rezultat tih zabrinutosti, potiče se rana suradnja s potencijalno pogođenim stranama i osobama koje posjeduju sporazum o pravu služnosti koridorom cjevovoda kako bi se pružile sve potrebne informacije i raspravilo kako će se rješavati problemi tijekom napuštanja, a i u budućnosti ako do njih dođe.

Svaki plan napuštanja cjevovoda mora biti napravljen prema zahtjevima koje propisuje nadležno tijelo države u kojoj se radovi obavljaju. Plan mora biti prilagođen specifičnostima projekta i u skladu s trenutnim regulatornim zahtjevima. U zahtjevu za napuštanjem bi trebao utvrditi jesu li zemljoposjednici, stanari, rukovoditelji zemljišta, najmodavci, općinske službe, ulazni i krajnji korisnici te ostale osobe, koje bi mogle biti pogođene napuštanjem cjevovoda, obaviješteni i savjetovani o svim koracima postupka napuštanja. Takvo savjetovanje uključuje (Revie, 2015):

1. detalje o prostorima koji zahtijevaju sanaciju ili čišćenje zemlje i podzemnih voda;

2. raspravu o tome koji dijelovi cjevovoda i nadzemnih objekata moraju biti uklonjeni;
3. informacije o procesu obnove zemljišta i
4. informacije o tome kako će se ublažiti potencijalni problemi.

Također, može postojati treća strana koja je zainteresirana za korištenje cjevovoda koji se napušta, pristupnih cesta ili pripadajućih objekata, kao na primjer benzinskih stanica, ukoliko nadležna tijela to dopuštaju. Plan napuštanja je najbolje sredstvo za smanjivanje rizika prema javnosti, okolišu, imovini i vlasniku cjevovoda na prihvatljivu razinu.

## 2.1. Procedura napuštanja cjevovoda i pridruženih objekata

### *Čišćenje cjevovoda*

Čišćenje cjevovoda tijekom procesa napuštanja je ključno bez obzira hoće li cjevovod napušten na lokaciji biti kompletno uklonjen zbog zbrinjavanja ili ostavljen za ponovnu upotrebu. Svaka od ovih opcija napuštanja ima propisane zahtjeve za čistoću unutrašnjosti cjevovoda kako bi se osigurala zaštita okoliša i svaka osoba koja dolazi u kontakt s cijevi. Cjevovod može korodirati u nekom trenutku te ukoliko nije postignut visok stupanj čistoće unutrašnjosti cjevovoda, zbog propuštanja cjevovoda onečišćenje može ugroziti sigurnost okoliša.

Posebni izazov predstavljaju cjevovodi o kojima se ne zna u kakvom se stanju nalaze. Ako je cjevovod neko vrijeme neaktivan, postoji mogućnost njegovog oštećenja, što znači da neće izdržati klasično čišćenje čistačima cjevovoda (engl. *pig*) kojima se uklanjaju nečistoće nakupljene na stijenkama cijevi. U slučajevima kada se za protiskivanje čistača kroz cjevovod koristi stlačen plin treba voditi računa o sigurnosti radnika koji obavljaju čišćenje. Takve operacije mogu izazvati i ispuštanja sadržaja cjevovoda u okoliš ukoliko cjevovod ne izdrži tlak tijekom faze čišćenja. Zbog navedenih razloga, kada se ne zna stanje cjevovoda koji se priprema za napuštanje, za čišćenje unutrašnjosti prvo se koriste vakuumske pumpe i savitljivi tubing kako bi se uklonilo što više fluida, a tek onda se protiskuju čistači ili se unutrašnjost ispiru mlazom slatke vode. Ispiranje mlazom slatke vode traje sve dok se na izlazu iz cjevovoda ne pojavi čisti fluid. Nakon toga se može pristupiti uklanjanju zaostalih nakupina na stijenkama primjenom čistača za čije se pokretanje treba odrediti siguran tlak protiskivanja plina kako ne

bi došlo do oštećenja cjevovoda. U nekim slučajevima za protiskivanje čistača mora se koristiti slatka voda. Učinkovitost bilo koje metode čišćenja ovisi o samom cjevovodu, odnosno njegovom promjeru, duljini, i lokaciji kao i o fluidu koji se nalazi u njemu.

Procedura čišćenja cjevovoda koja će biti opisana u nastavku preporučena je za plinovode za transport suhog prirodnog plina i naftovode s relativno malom količinom nakupina parafina kod kojih su potrebne povremene operacije struganja stijenki, kao metode čišćenja.

Operator cjevovoda trebao bi osigurati odgovarajuća mjesta za ubacivanje i hvatanje čistača. To može zahtijevati instalaciju privremenih dodatnih objekata na trasi cjevovoda. Ako je cjevovod koji se napušta dio većeg cjevovoda, treba ga po završetku operacije čišćenja odvojiti na svim konekcijama. Tijekom čišćenja cjevovoda treba primjenjivati mjere opreza primjerene opasnostima koje mogu nastati uslijed fluida koji se nalazi u cjevovodu (npr. zapaljivost i eksplozivnost ugljikovodika, toksičnost kiselih plinova).

Kod plinovoda, nakon smanjenja tlaka u cjevovodu do određene razine pomoću povezanih objekata ili pomoću kompresora za smanjivanje tlaka (engl. *pull down compressor*), zaostali plin treba ispustiti preko ventila u atmosferu ili spaliti.

Kod naftovoda, prije prekidanja protoka, potrebno je kroz cjevovod protisnuti dovoljan broj čistača kako bi se uklonila većina krutih čestica ili nakupine parafina sa stijenki cijevi. Kao učinkovita metoda uklanjanja nakupina parafina ili krutih čestica preporučuje se da se između dva čistača-strugača protisne otapalo na bazi ugljikovodika, kao što su dizel ili kondenzat. Ovaj postupak se ponavlja sve dok se na izlaznim mjestima na strugačima ne mogu više uočiti nakupine krutina ili parafina.

Ukoliko opisane metode čišćenja unutrašnjosti cjevovoda nisu bile uspješne, ukoliko se unaprijed zna da se u cjevovodu nalazi velika količina nečistoća ili se moraju postići neuobičajeno visoki standardi čistoće cjevovoda, treba primijeniti kemijske metode čišćenja. Postoje specijalizirane kompanije koje nude usluge takvog čišćenja cjevovoda koristeći vlastite komercijalne kemikalije, otapala ili gelove za točno određene vrste onečišćivača. Pri otvaranju cjevovoda potrebno je provoditi posebne mjere opreza zbog opasnosti od pojave zapaljivih, eksplozivnih i otrovnih para (npr. benzena). U slanovodima kojima se dulje vrijeme transportira slajna voda mogu biti prisutne nakupine koje sadrže određene koncentracije prirodno

pojavljujućih radioaktivnih materijala (engl. *naturally occurring radioactive materials – NORM*). Takvi cjevovodi mogu zahtijevati dodatno razmatranje u pogledu postupaka čišćenja ili u pogledu njihove prihvatljivosti za napuštanje na lokaciji.

#### *Čišćenje plinovoda*

Čišćenje plinovoda koji transportiraju prirodni plin podrazumijeva protiskivanja neoprenskih strugača kroz plinovod, pri konstantnoj brzini sukladnoj s preporukama proizvođača, pomoću dušika ili nekog drugog inertnog plina kako bi se spriječilo stvaranje eksplozivne smjese. Slobodni fluidi koji se protiskuju i nalaze ispred strugača mogu se usmjeriti u nizvodni tok plinovoda ili skupljati u posebni spremnik za zadržavanje onečišćenja koji je dizajniran i izoliran u skladu s važećim lokalnim smjernicama, zakonima i podzakonima za zbrinjavanje onečišćivača. Ovaj postupak treba ponavljati sve dok vizualnim pregledom ne budu vidljivi tragovi fluida na mjestu izlaza strugača iz plinovoda. Niže dijelove plinovoda treba provjeravati kako bi se uočile nakupine fluida ili drugih onečišćivača.

Treba provjeriti razinu čistoće plinovoda nakon prvih protiskivanja strugača. Ako je onečišćenje još prisutno, treba ponoviti proces čišćenja, ali ovaj put s otapalom između dva strugača. Kao i kod slobodnih fluida, otapalo se treba prikupiti u spremniku za zadržavanje i zbrinuti u skladu s lokalnim smjernicama i zakonskim aktima. Pare otapala treba ukloniti dušikom ili drugim inertnim plinom.

#### *Čišćenje naftovoda*

Nakon završetka početnih operacija čišćenja naftovoda, potrebno je provesti završni korak čišćenja.

Određeni volumen tekućih ugljikovodika koji imaju svojstva otapala, kao što su kondenzat ili dizel, utiskuje se između dva neoprenska čistača koji se protiskuju kroz naftovod konstantnom brzinom pomoću inertnog plina, obično dušika. Po potrebi se u otapalo mogu dodati i drugi aditivi. U pravilu bi, volumen otapala trebao omogućiti da minimalno vrijeme kontakta otapala i unutarnje stijenke cijevi bude između 5 i 10 minuta (ili duže), ovisno o učinkovitosti početnog postupka čišćenja.

Kod naftovoda s velikom količinom nakupina parafina ili krutih čestica na stijenkama, može se razmatrati korištenje dodatnog volumena otapala koji prethodi prvom strugaču. Sva

vremena kontakta stijenki i otapala treba povećati kada se radi o duljim dionicama naftovoda koji se treba obraditi jer se otapalo može zasititi ugljikovodicima prije dostizanja kraja dionice. Na kraju se otapalo i ugljikovodici protiskuju u drugi dio naftovoda ili skupljaju u spremnik za zadržavanje.

Opisani proces čišćenja stijenki naftovoda primjenom dva čistača s otapalom između njih treba ponavljati sve dok ima naznaka o zaostalim fluidima ili drugim onečišćenjima na stijenkama. Učinkovitost postupka čišćenja može se procijeniti uzimanjem uzoraka otapala neposredno prije izlaska drugog čistača iz cjevovoda (u intervalima od približno 25 km) i analizom na sadržaj ugljikovodika ili praćenjem i usporedbom kvalitete i količine otapala na izlazu s onom na ulazu u naftovod. U završnoj fazi čišćenja, kada se koriste otapala, moraju se protisnuti obični čistači kako bi se uklonili ostaci otapala (Revie, 2015).

#### *Uklanjanje objekata i uređaja*

Napušteni podzemni cjevovod treba biti začepljen na krajevima i fizički odvojen od bilo kojeg aktivnog cjevovoda. Također, sva povezana površinska oprema koja nije dijelom drugog, radnog, cjevovoda, treba biti uklonjena do dubine cjevovoda koji se napušta. Primjeri takve opreme mogu biti rajzer cijevi (engl. *pipeline risers*), otvori za ventilaciju prstenastog prostora između lajnera i cijevi u koji je ona ugrađena (engl. *casing vents*), podzemna kućišta s ventilima (engl. *underground valve vaults*), otvori za pregled cjevovoda (engl. *inspection bell holes*) te oprema za katodnu zaštitu kao što su ispravljači koji služe za pretvorbu izmjenične u istosmjernu struju (engl. *cathodic protection rectifiers*), površinski testni stupovi za povezivanje i mjerenje učinkovitosti katodne zaštite (engl. *test posts*) te kablovi za spajanje anoda s cjevovodom i testnim stupom (engl. *anode wiring*).

Napuštene površinske cjevovode i pripadajuću površinsku opremu treba u potpunosti ukloniti. Oprema može uključivati mehaničku i električnu opremu, zgrade i objekte, pripadajuće cjevovode, nosače i temelje. Nadzemne spremnike ili posude pod tlakom treba isprazniti od tekućina, očistiti i zaštititi od neovlaštenog ulaska sve do trenutka zbrinjavanja ili ponovne upotrebe na drugoj lokaciji. Ako se spremnici uklanjaju zbog zbrinjavanja, potrebno je provesti sigurnosne provjere s ciljem utvrđivanja jesu li svi opasni ostaci onečišćenja učinkovito uklonjeni i ispunjavaju li regulatorne zahtjeve za zbrinjavanje. Pri premještanju ili rukovanju



izolirane opreme potrebno je biti posebno oprezan zbog mogućnosti prisustva azbesta te može biti potrebno primijeniti operacije uklanjanja ili sigurne izolacije azbesta.

Također se preporučuje uklanjanje svih podzemnih objekata kao što su podzemna kućišta s ventilima, zatvorene jame ili spremnici. Tada se unutrašnjost objekta može ispuniti čistom zemljom. Kod podzemnih spremnika može doći do propuštanja fluida u tlo kroz stijenke ili spojna mjesta na spremniku. Stoga, treba provoditi ispitivanja kojima bi se utvrdio integritet spremnika i moguća propuštanja kako bi se na vrijeme moglo pristupiti sanaciji tla.

Osim uklanjanja infrastrukture, konačna obnova zemljišta treba uključivati uklanjanje šljunčanih nanosa, mehaničku dekompakciju tla kojom se omogućava brže oporavljanje tla te uklanjanje nepotrebnih pristupnih puteva.

#### *Vode*

Rijeke, potoci, jezera i močvare predstavljaju posebne probleme kod napuštanja cjevovoda. Postoji nekoliko načina postavljanja cjevovoda u slučaju vodenih tijela (Revie, 2015):

1. instalacija cjevovoda ispod dna vode korištenjem usmjerenog horizontalnog bušenja;
2. „mokri“ prijelaz koji uključuje izradu kanala na dnu vode u koji se smješta cjevovod;
3. „mokri“ prijelaz kod kojeg se cjevovod zadržava na dnu vode pomoću betonskih utega (engl. *concrete saddle weights*) i
4. instalacija cjevovoda na nosačima iznad vode.

Ako se cjevovod koji prolazi kroz vodu napušta na lokaciji, moguća je pojava potencijalnih opasnosti. Jedna od njih je perforiranje cjevovoda pod utjecajem vanjskih sila uslijed čega cjevovod postaje kanal za istjecanje onečišćivača u vodu. Moguća je i obrnuta situacija u kojoj perforirani cjevovod usisava vodu. Također, prisutan je i rizik da se cjevovod izdigne bliže površini vode pa predstavlja navigacijski rizik ili prepreku na kojoj se zadržavaju ostaci (grane, lišće) koji plutaju rijekom, što može utjecati na riječni tok.

Bilo da ga se napušta na lokaciji ili u potpunosti uklanja, postupak čišćenja cjevovoda koji prolazi iznad vode zahtijeva dodatne mjere opreza. U tim slučajevima prikupljanje fluida za čišćenje mora se provoditi s velikom pažnjom. Ako se cjevovod u potpunosti uklanja s lokacije, onda se primjenjuju svi sigurnosni regulatorni zahtjevi za dekonstrukciju cjevovoda

iznad vode kako bi se postigla maksimalna zaštita biljnog i životinjskog svijeta, ribarske zone i vodene vegetacije. Ukoliko se cjevovod napušta na lokaciji treba ga ispuniti inertnim materijalom, odviti od svih priključaka i začepiti na krajevima kako bi se spriječilo da cjevovod postane kanal za dotjecanje vode (engl. *conduit effect*).

Nadalje, budući da se cjevovod pod djelovanjem erozije s vremenom razgrađuje, može doći do odvajanja većih komada koji se onda vodenom strujom nose nizvodno. Takva izloženost cjevovoda na obali vodene formacije ili plutanje cjevovoda na površini vode predstavlja dugoročan potencijalni problem koji se treba spriječiti praćenjem stanja napuštenog cjevovoda i ublažavanjem efekta erozije te ga u konačnici treba ukloniti ako se pokaže da je opasnost prevelika.

Cjevovode na nosačima iznad vode treba ukloniti u cijelosti budući da će s vremenom noseća konstrukcija oslabiti i izgubiti svoja nosiva svojstva, zbog čega može doći do urušavanja cjevovoda i propadanja u vodu.

Postupak napuštanja cjevovoda može zahtijevati uklanjanje dijelova cjevovoda i opreme s koridora cjevovoda koji je dio privatnog ili javnog zemljišta. Također, kako bi se provelo čišćenje cjevovoda te ugradili čepovi za zatvaranje provest će se operacije iskopavanja tla. Zbog toga se površina zemljišta mora na tim lokacijama obnoviti ili vratiti u stanje usporedivo s okolnim zemljištem, osim ako regulatorna tijela ne zahtijevaju drugačije. To također znači da se produktivnost poljoprivrednog tla mora obnoviti u određenom roku (obično je to u roku od 5 godina), a vegetacija mora biti zasađena i održiva kao dokaz te produktivnosti. Na neobradivim zemljištima, može biti potrebno vratiti zemljište definirano koridorom cjevovoda u izvorno stanje sadnjom autohtonih vrsta. Treba biti oprezan i provoditi buduće provjere kako bi se osiguralo da se štetni korovi i strana vegetacija ne bi s prilikom napuštanja cjevovoda unijeli slučajno na trasu cjevovoda koja se zatrpava. Stupanj obnove koridora cjevovoda ovisit će o zahtjevima regulatornih državnih ili lokalnih tijela i sporazumima s vlasnicima zemljišta. Osim toga, svi uređaji koji su se koristili pri radu cjevovoda moraju se ukloniti na dubinu koja neće ometati poljoprivrednu aktivnost.

Svi površinski i podzemni uređaji, uključujući signalizaciju, duž trase cjevovoda koji se treba napustiti uklanjanjem također se uklanjaju kao dio procesa napuštanja. S druge strane, ako

se cjevovod napušta, ali ostaje na lokaciji, potrebno je zadržati signalizaciju zbog informiranja osoba koje provode radove na zemljištu.

## 2.2. Nadzor nakon napuštanja cjevovoda

Nakon što je cjevovod napušten u skladu sa zahtjevima i željama regulatornih tijela i zemljoposjednika, sva preostala infrastruktura i koridor cjevovoda mogu biti izloženi različitim prirodnim, fizičkim pojavama ili problemima kao što su slijeganje i urušavanje tla, vremenske nepogode, stvaranje klizišta. Takve pojave mogu utjecati na iskoristivost zemljišta na kojem se nalazi ili se nalazio cjevovod te ih treba razmotriti tijekom izrade plana napuštanja cjevovoda kako bi se definirali postupci za njihovo ublažavanje.

### *Slijeganje tla*

Svaka podzemna konstrukcija može dovesti do stvaranja šupljina u strukturi tla. Prirodni proces smirivanja ili slijeganja tla, često potpomognut filtracijom vode, vodi ka stvaranju depresija, tj. udubljenja na površini. Takva udubljenja mogu stvarati probleme u prometu, na vodenim površinama, uzrokovati neočekivano otjecanje vode, eroziju i sl. U većini slučajeva gdje cjevovod nije uklonjen s lokacije, struktura tla ostat će stabilna i neće doći do slijeganja. Ukoliko do njega s vremenom ipak dođe potrebno je popuniti udubljenja odgovarajućim tlom, a to je obično gornji sloj tla.

### *Propadanje i urušavanje cijevi*

S obzirom da su čelični cjevovodi podložni koroziji prvotno na mjestima gdje je antikorozivni premaz jače oštećen, uobičajena je pretpostavka da će se cjevovod s vremenom perforirati i na kraju urušiti. Međutim, postoje mnogi čimbenici koji utječu na koroziju i postoje mnogi čimbenici koji utječu na urušavanje tla.

Korozija će se obično pojaviti na vanjskoj strani cjevovoda jer je unutrašnjost zaštićena od vanjskog okruženja čepovima koji ne dopuštaju ulazak onečišćenja u cjevovod. Brzina vanjske korozije ovisit će o prisutnosti vlage i svojstvima tla te brzini pogoršanja stanja vanjskih antikorozivnih premaza. Budući da su vanjski premazi općenito polimerni, oni mogu ostati stabilni duži vremenski period prije nego što dođe do njihove razgradnje. Razgradnja se u početku događa lokalno, ali na kraju se može očekivati da će biti široko rasprostranjena.

Međutim, perforacije nastale razgradnjom antikorozivnog premaza bit će slučajnog rasporeda i nedovoljno koncentrirane na jednom mjestu kako bi uzrokovale potpuno urušavanje značajne duljine cjevovoda.

Perforacije nastale zbog vanjske korozije cjevovoda mogu biti putevi za ulazak vlage u unutrašnjost cjevovoda gdje bi se korozija mogla pojaviti prvenstveno na dnu cjevovoda.

S obzirom na spori razvoj korozije i sposobnost cijevi da održava čvrstoću čak i uz prisutnost perforacija, moguće je da desetljećima neće doći do urušavanja. Tijekom tako dugog vremenskog perioda tlo u blizini cjevovoda može ublažiti bilo kakvu nastalu površinsku depresiju te pružiti potporu cjevovodu za vrijeme bočnih kretanja tla. Međutim, kako se cjevovod s vremenom raspada za očekivati je da će se postupno ispunjavati tлом. Rezultat ispunjavanja unutrašnjosti cjevovoda tлом može biti postupno nastajanje površinske depresije koja bi bila vidljiva samo kod cjevovoda velikih promjera. Ako tlo iznad cjevovoda ima stabilnija svojstva, poput glinenih tala, onda bi tlo moglo izdržati veća vertikalna opterećenja i oduprijeti se urušavanju, no s vremenom bi došlo do slijeganja površine.

#### *Površinsko izlaganje cjevovoda*

Da bi došlo do površinskog izlaganja cjevovoda, tlo u kojem se nalazi mora biti uklonjeno, a to se može postići na nekoliko načina. Tlo se može ukloniti mehaničkim sredstvima ako se ljudska aktivnost ne kontrolira. Međutim, najčešće se to događa zbog erozije uzrokovane djelovanjem vode ili vjetrova. Mjesta koja su najosjetljivija na eroziju su ona kod kojih su prisutna fina, sitna i nekonsolidirana tla te veliki nagibi zemljišta. Rovovi, odnosno iskopani kanali kojima prolaze cjevovodi mogu erodirati u prisustvu podzemnih voda ili nagiba, ukoliko dođe do pokretanja tla, jer nekonsolidirani materijal kojim je okružen cjevovod može lakše erodirati od susjednih zbijenih i povezanih tala. Ponekad je potrebno ugraditi uređaje za odvodnju vode (engl. *water breaking devices*) kako bi se spriječilo kretanje podzemnih voda kroz nekonsolidirane materijale u kanal kojim prolazi cjevovod, iako se to obično radi u vrijeme početne izgradnje.

Kada je riječ o napuštanju dijela cjevovoda koji se nalazi u blizini vode, preporučuje se njegovo potpuno uklanjanje s obzirom da može biti izložen poplavama.

#### *Efekt stvaranja kanala za protjecanje vode*

Kada se napušteni cjevovod ostavlja na lokaciji, eventualno djelovanje korozije može omogućiti ulazak vode u cjevovod. Ako je izvor vode značajnog volumena, tada se može stvoriti ozbiljan problem nizvodno, gdje voda može izaći iz cjevovoda i uzrokovati eroziju tla, oštećenje vegetacije, vrtače ili na drugi način utjecati na imovinu. Također, takvo stvaranje umjetnog drenažnog sustava može poremetiti prirodne uvjete otjecanja vode što može utjecati na ekosustave te u nekim slučajevima prekinuti opskrbu vodom.

Efekt stvaranja kanala za protjecanje vode može se spriječiti ugradnjom čepova s obje strane cjevovoda u vrijeme napuštanja. Čepovi bi trebali biti dovoljno dugi da spriječe koroziju i treba uzeti u obzir položaj čepova jer će stijenka cjevovoda uz čep s vremenom opet korodirati i omogućiti ulazak vode. Čepovi bi trebali prianjati uz stijenkku cjevovoda, biti nepropusni, ne skupljati se i biti otporni na propadanje. Primjeri prikladnih materijala za izradu čepova su betonska žbuka ili poliuretanska pjena.

Čepove treba postaviti na oba kraja napuštenog cjevovoda, nizvodno od svih vodnih formacija ili poznatih uvjeta protjecanja velikih količina vode te uzvodno od vodnih formacija i ekološki osjetljivih područja kako bi se spriječilo onečišćenje ili dovođenje sedimenta.

#### *Stabilnost zemljišta pod nagibom*

Cjevovode koji se napuštaju treba ostaviti na lokaciji kada je riječ o nestabilnim padinama jer cjevovod pruža potporu nagibu, a sanacija je prezahtjevna. U većini slučajeva promet vozila na padinama može uzrokovati gubitak pokrovnog sloja tla i samim time izlaganje cjevovoda površini. Zbog toga se promet vozila na padinama treba svesti na najmanju moguću mjeru i samo onda kada je neophodno. Ako se napušteni cjevovod ipak u potpunosti ukloni s padine, preporuča se sanacija i obnova zemljišta sadnjom brzorastuće vegetacije te je potrebno nadgledanje i praćenje stanja u periodu od nekoliko godina.

U očekivanju kvara i propadanja čepova cjevovoda, treba pristupiti mjerama ublažavanja efekta stvaranja kanala za protjecanje vode na kosini. Ako ponovno čepljenje cjevovoda nije moguće ili je rizik od urušavanja padine zbog potencijalnog transporta vode kroz cjevovod prevelik, onda se trebaju izraditi izlazi iz cjevovoda na mjestima gdje može doći do rasipanja energije i gdje je prihvatljivo ispuštanje sedimenata, kako bi se spriječila korozija cjevovoda.

### *Nadgledanje, održavanje i prenamjena zemljišta*

Za cjevovode koji se napuštaju na lokaciji, nužno je da uz njih ostane i ispravna površinska signalizacija kako bi se osobe koje provode radove na tom zemljištu obavijestile o lokaciji samog cjevovoda te kako bi se izbjegle opasnosti od iskapanja ili oštećenja cjevovoda korištenjem poljoprivrednih ili drugih strojeva. Često su potrebni podaci o kontaktu vlasnika te kontaktu pozivnog centra, ako takav centar postoji, koji posjeduje informacije o točnoj lokaciji cjevovoda. Periodično treba također provjeravati stanje koridora kako bi se utvrdilo postoji li potreba za sanacijom tla uslijed slijeganja, izloženosti cjevovoda površini, korozije i otklanjanjem izraslog korova. Kada se razmišlja o prenamjeni zemljišta, možda će biti potrebno potpuno ukloniti cjevovod napušten na lokaciji kako bi se zemljište prilagodilo razvojnom planu kao što je npr. izgradnja ceste ili stambenog prostora.

### *Odgovornost i izvor financiranja*

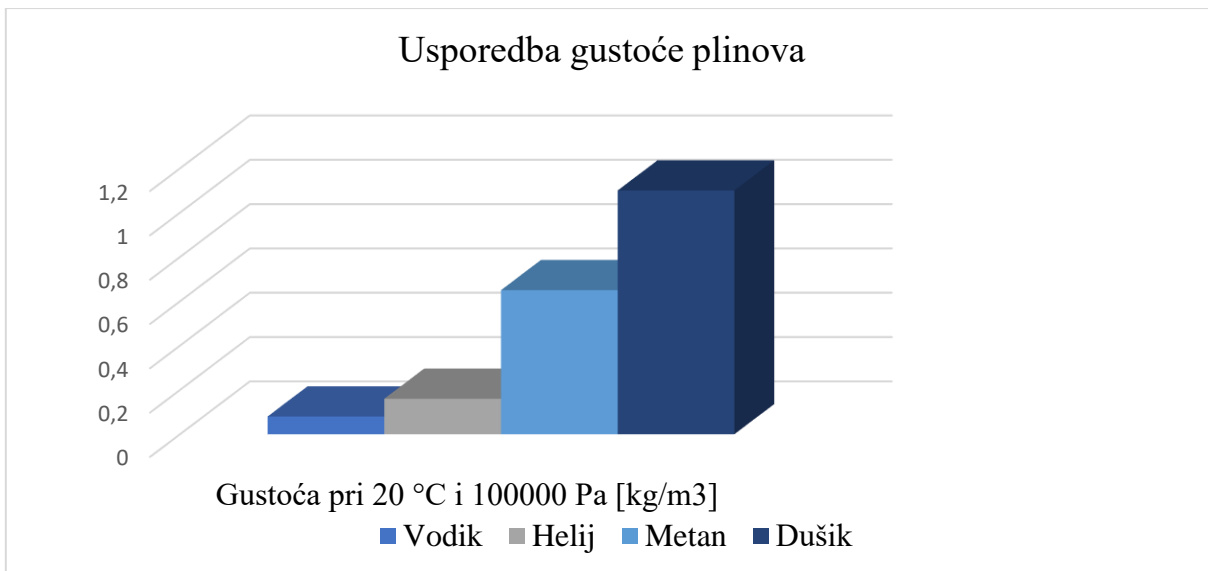
Prema zakonima nekih država, napušteni cjevovod ostaje odgovornost vlasnika sve dok se u potpunosti ne ukloni s lokacije, dok kod drugih odgovornost nije jasno podijeljena jer se zakonska regulativa primjenjuje samo za transport proizvoda. Većina sjevernoameričkih regulativa za zaštitu okoliša ima načelo "onečišćivač plaća" gdje je svaka zaostala kontaminacija, nastala nakon napuštanja cjevovoda, odgovornost subjekta koji je uzrokovao onečišćenje.

Kompanije koje provode proces napuštanja cjevovoda moraju imati dovoljno sredstva ne samo za provođenje fizičkog napuštanja, već i za ublažavanje eventualnih problema nastalih nakon napuštanja u područjima njihove odgovornosti. U većini kompanija postoje minimalna sredstva namijenjena za nadgledanje i praćenje stanja napuštenog cjevovoda. Svim kompanijama se preporuča odvajanje sredstava u određenom postotku od prihoda ostvarenih tijekom radnog vijeka cjevovoda kako bi se sačuvala sredstva za nadgledanje i održavanje napuštenog cjevovoda te rješavanje nepredviđenih situacija. Alternativa opisanom postupku je stvaranje sigurnosnog fonda kojim upravlja „treća strana“ u svrhu brige za cjevovodom, ukoliko kompanija u čijem je vlasništvu cjevovod prestane postojati.

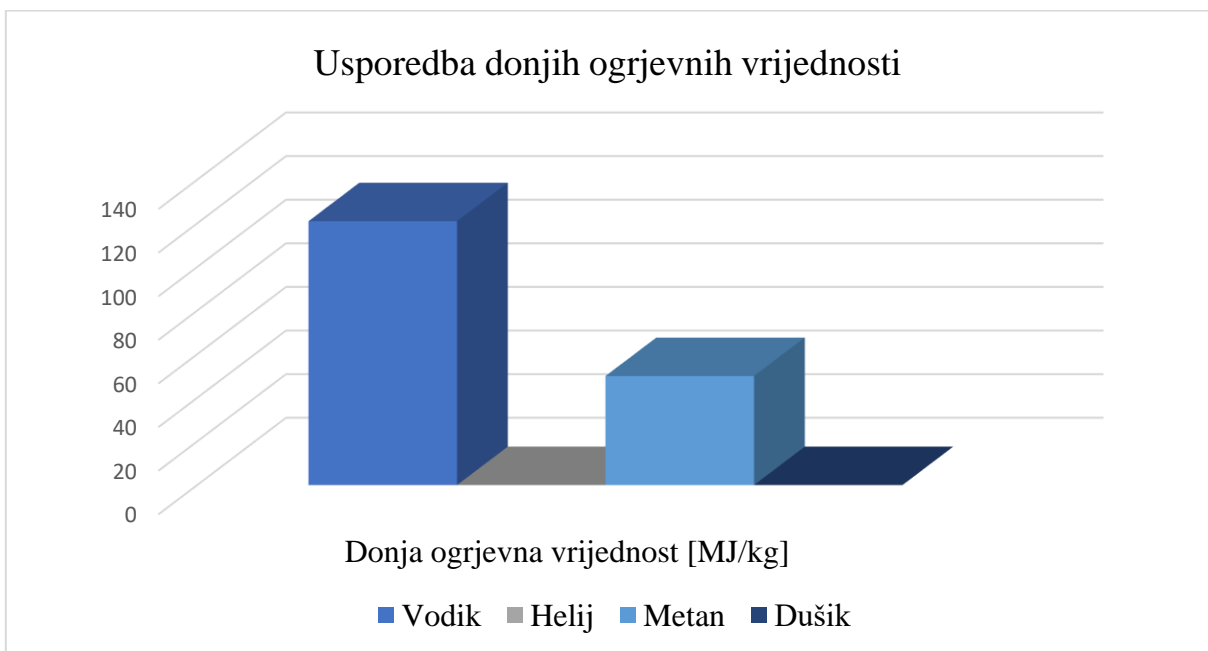
### 3. VODIK I NJEGOVA SVOJSTVA

Vodik je najmanji i najlakši kemijski element te je ujedno i najrasprostranjeniji element u svemiru no, zbog svoje sklonosti stvaranju kovalentnih veza s većinom ostalih elemenata, elementarni vodik nalazi se na Zemlji u izrazito malim količinama. Pri standardnim uvjetima tlaka i temperature je plin bez mirisa i okusa, bezbojan, vrlo zapaljiv i neotrovan. Najzastupljeniji kemijski spojevi u kojima vodik prevladava na Zemlji su voda i ugljikovodici. Transport bilo kojeg fluida cjevovodom povezan je s rizicima nastanka nepoželjnih i štetnih događaja, koji se kao i posljedice nastale ako se ostvare takvi događaji, moraju razmotriti u fazi planiranja izgradnje ili prenamjene cjevovoda. Rizični događaji koji predstavljaju sigurnosne probleme tijekom transporta vodika cjevovodima prvenstveno su povezani sa svojstvima vodika i njegovom sposobnošću zapaljenja. Mala veličina atoma vodika povećava mogućnost prodora vodika kroz rešetkastu strukturu materijala od kojeg je građen cjevovod.

Gustoća vodika znatno je manja od gustoće bilo koje druge tvari, a usporedba s nekim plinovima prikazana je na slici 3-1. Vodik je pri atmosferskim uvjetima približno deset puta lakši od prirodnog plina i petnaest puta lakši od zraka, što znači da je disperzija vodika brža u odnosu na ostale plinove. Bitno svojstvo vodika je visoka ogrjevna vrijednost, koja je skoro dva i pol puta veća od ogrjevne vrijednosti metana (slika 3-2.). Velika ogrjevna vrijednost vodika u određenoj mjeri nadoknađuje manju vrijednost gustoće kada je riječ o količini energije koja se prenosi cjevovodom te također ima za posljedicu oslobađanje velike količine energije kod zapaljenja i eksplozije plina. U određenim situacijama transport vodika obavlja se zajedno s prirodnim plinom gdje te dvije komponente čine smjesu u kojoj je sačuvana određena količina energije, koja se može odrediti i ovisi o masenom udjelu pojedine komponente u smjesi.



**Slika 3-1.** Usporedba gustoće nekih plinova (The Engineering ToolBox, 2022)



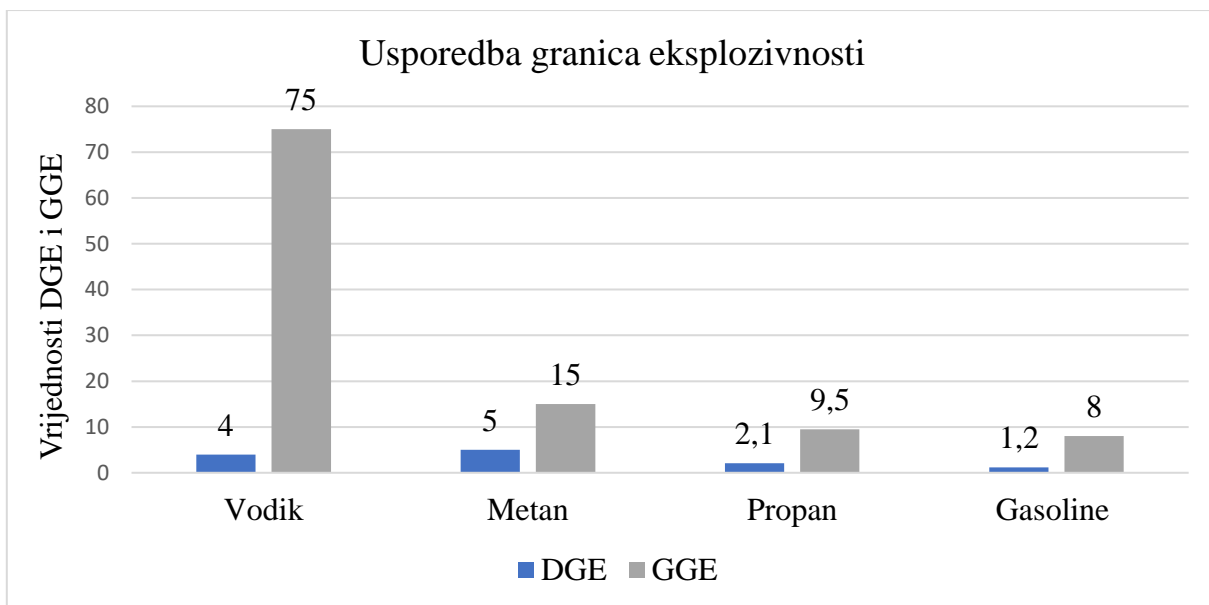
**Slika 3-2.** Usporedba donjih ogrjevnih vrijednosti nekih plinova (prema Collberg et al., 2021)

Zapaljivost je bitno svojstvo vodika i upravo je to glavna karakteristika koja stvara probleme kod istjecanja vodika ili mješavine prirodnog plina i vodika iz cjevovoda. Općenito, raspon koncentracija nekog plina u smjesi sa zrakom koji pod utjecajem izvora paljenja izaziva



eksploziju, naziva se eksplozivna atmosfera koja je ograničena s donjom (DGE) i gornjom (GGE) volumnom granicom eksplozivnosti razmatranog plina. Za vodik, DGE iznosi 4%, a GGE 75% volumne koncentracije u zraku, dok je za prirodni plin raspon puno manji i DGE iznosi 5%, a GGE 15%. Usporedba vrijednosti donjih i gornjih granica eksplozivnosti za pojedine plinove prikazana je na slici 3-3. Temperatura pri kojoj će doći do spontanog zapaljenja vodika iznosi 500 °C (Lumen Learning, 2022). Za usporedbu žar cigarete proizvede temperaturu od 650 °C, plamen šibice od 870 °C, a električni kratki spoj od 3 870 °C (BUILD PROTECT d.o.o., 2022). Veliki raspon između DGE i GGE kod vodika povećava raspon uvjeta u kojima može doći do eksplozije smjese vodika i zraka ukoliko smjesa dođe u kontakt s izvorom paljenja, pogotovo iz razloga što su istjecanja iz cjevovoda često neujednačena te su podložna razrjeđivanju zrakom ili izlaganjem vjetru. Zbog svega navedenog, veći rizik i opasnost predstavlja postojanje širokog raspona uvjeta zapaljivosti vodika zbog čega je dovoljan energetska slab izvor paljenja od same činjenice da vodik u mješavini sa zrakom čini zapaljivu smjesu.

Eksplozivna atmosfera mješavine prirodnog plina i vodika bit će srednja vrijednost pojedinačnih koncentracija pojedine komponente. Na primjer, za udio vodika od 10% u smjesi s prirodnim plinom DGE će ostati nepromijenjena, a GGE će se povećati sa 15% za prirodni plin na 17,9% za smjesu s vodikom. Za udio vodika od 50% GGE će se povećati na otprilike 25% (Collberg et al., 2021). U usporedbi s prirodnim plinom, vodik je puno lakši, stvaranje eksplozivne smjese sa zrakom događa se u širem rasponu uvjeta te ima negativan utjecaj na svojstva materijala od kojih je građen cjevovod. Kod određivanja utjecaja vodika na stabilnost i svojstva oštećenog cjevovoda treba uzeti u obzir i razna opterećenja koja se javljaju s površine i smetnje koje mogu izazvati neovlašteni radovi na lokaciji cjevovoda, jer je veličina utjecaja vodika na cjevovod ovisna o tlaku vodika, ali i frekvenciji opterećenja.



**Slika 3-3.** Usporedba donjih i gornjih granica eksplozivnosti (prema Collberg et al., 2021)

Ekonomski koncept iskorištavanja i upotrebe vodika kao energenta opisan je prije više od 100 godina od strane J.B.S Haldan-a (Parfomak, 2021). Početkom 19. stoljeća, plin korišten za osvjetljene ulica i zgrada bio je primarno proizveden iz ugljena, smole, naftnih derivata ili kitovog ulja. Uobičajeni naziv za takav plin bio je „gradski plin“ ili „vodeni plin“, a sastojao se od vodika, metana, ugljikovog monoksida (CO) te malog udjela ugljikovog dioksida (CO<sub>2</sub>) i dušika. Udio vodika u „gradskom plinu“ varirao je od 10 do 50%. Takav plin transportiran je mrežom cjevovoda koja je tek bila u nastajanju te je postala temelj velikih distribucijskih sustava plina u mnogim američkim gradovima. Međutim, povećana dostupnost jeftinijeg prirodnog plina dobivenog iz domaćih rezervi početkom 1940-ih godina postupno je istisnula „gradski plin“ iako se on u nekim zajednicama koristio sve do 1950-ih godina. Danas je „Hawaii Gas“ jedina kompanija za transport plina u SAD-u koja distribuira sintetički proizveden plin sa značajnom koncentracijom vodika, koji je dobiven iz nafte i sadrži 12% vodika (Parfomak, 2021).

Industrijsko iskorištavanje vodika započelo je u prvoj polovici 20. stoljeća, a u novije vrijeme Sjedinjene Američke Države (SAD) i Europska Unija (EU) razvile su suradnju s ciljem zajedničkog gospodarskog razvoja proizvodnje, obrade, transporta i iskorištavanja vodika. Transport vodika zasebnim cjevovodom nije nov koncept, ali je postojeća infrastruktura za

transport vodika mala u usporedbi sa svjetskim sustavima cjevovoda za transport nafte i plina. Mreža cjevovoda za transport vodika koja bi zadovoljila svjetske potrebe trebala bi biti mnogo dulja i s mnogo širim geografskim dosegom od trenutnog. Vodik se također miješao sa prirodnim plinom u nekim sustavima transporta cjevovodima te se danas na taj način značajne količine transportiraju diljem svijeta, no trenutno su se javile određene prepreke koje ograničavaju korištenje ovog pristupa. Uspostava nacionalne mreže novih cjevovoda za transport vodika ili prenamjena postojećih plinovoda za transport vodika predstavlja brojne izazove povezane s tehnologijom, zakonskim upravljanjem i ekonomijom (Parfomak, 2021).

Iako se gotovo sav transport vodika u SAD-u, ali i ostalim dijelovima svijeta odvija putem zasebne mreže cjevovoda, neke kompanije koje se bave transportom plina pokrenule su projekte za procjenu učinkovitosti transporta cjevovodima mješavine prirodnog plina sa značajnijom koncentracijom vodika. Jedan operator transporta prirodnog plina u Italiji uspješno je proveo miješanje vodika u koncentraciji od 10% u dijelu svoje mreže za transport prirodnog plina koja opskrbljuje nekoliko velikih industrijskih kupaca. U narednim godinama očekuje se povećanje udjela vodika u mješavinama vodika i prirodnog plina u sustavima za transport prirodnog plina, ali analize predviđaju da je 20% vodika u smjesi najveća dozvoljena koncentracija prije značajnijeg povećanja troškova zbog potencijalnih negativnih utjecaja vodika na materijal od kojeg je cjevovod izgrađen. Također, oprema u elektranama i industrijskim postrojenjima, koja se opskrbljuje sustavom transporta prirodnog plina, možda neće biti pogodna za obradu većih koncentracija vodika, bez dodatnih modifikacija.

U okviru europskih pilot projekata susreće se miješanje do 20% volumena vodika s prirodnim plinom u izoliranim dijelovima distribucijskog sustava za prirodni plin. Najveći Europski projekt, u kojem su se udružile neke od vodećih europskih kompanija za transport prirodnog plina, pod nazivom „European Hydrogen Backbone“, planira prenamjenu velikog dijela mreže plinovoda kako bi do 2040. godine većina zapadne i srednje Europe imala razvijenu infrastrukturu za opskrbu vodikom.

U studenom 2020. godine, Southern „California Gas Company“ i „San Diego Gas & Electric Company“ podnijele su zajedničku prijavu državnim regulatornim tijelima za pokretanje demonstracijskog projekta miješanja vodika u njihovim distribucijskim sustavima plina u Kaliforniji. Nekoliko drugih američkih kompanija za transport plina cjevovodima predložilo je

ili pokrenulo testiranja miješanja vodika u sustavima plinovoda, ali nisu najavili planove za isporuku značajnih količina vodika u komercijalne svrhe.

Jedna od opcija kojom bi se riješio problem transporta vodika jest izgradnja potpuno novih sustava cjevovoda namijenjenih samo za transport vodika, ali kako je to dosta velika investicija, prenamjena postojećih cjevovoda uz određene manje modifikacije postaje najprimamljivija opcija. Međutim, opsežno uvođenje cjevovoda za transport vodika zahtijeva da se uspostavi najbolja moguća ravnoteža između sigurnosti i isplativosti kako bi se omogućilo optimalno projektiranje novih cjevovoda ili procjena prenamjene postojećih mreža cjevovoda.

Također, vodik je moguće transportirati i na druge načine osim putem cjevovoda. Vodik u plinovitom ili tekućem stanju, često se transportira u posebnim spremnicima na kamionima. Takav način transporta povoljna je opcija za kraće udaljenosti. Na sličan način vrši se i transport željeznicom, a transport brodovima još je u početnoj fazi.

U radu će biti opisan primjer analize prenamjene infrastrukturne mreže plinovoda za transport vodika u Njemačkoj kojom se je željela razmotriti opcija moguće financijski isplative prenamjene određenih dijelova mreže plinovoda kako bi se stvorili preduvjeti za šire, javno korištenje vodika kao energenta.

## 4. NAČINI TRANSPORTA VODIKA

Vodik se može proizvesti iz fosilnih goriva ili korištenjem energije dobivene iz obnovljivih izvora energije. Osim kao gorivo, vodik se može koristiti i za skladištenje energije te kada se to svojstvo poveže s električnom energijom nastalom iskorištavanjem obnovljivih izvora, kao što su vjetar, sunce i hidroenergija, mogu se spriječiti problemi uravnoteženja električne mreže koji nastaju zbog proizvodnje nepredvidivih količina električne energije. To je posebno istaknuto kod obnovljivih izvora jer su takvi sustavi obično direktno povezani na distribucijsku mrežu. Ovakav koncept transformacije viška proizvedene električne energije u vodik, koji se koristi za skladištenje energije, a potom i njegova distribucija ka područjima potražnje, predstavlja alternativu u energetskej strukturi.

Ovisno o udaljenosti koju treba prijeći i količinama koje se isporučuju, postoji nekoliko opcija za pristupačan i siguran transport vodika do željene lokacije koje uključuju transport cestom, željeznicom ili cjevovodima dok je transport brodovima, kada je riječ o oceanskom transportu, još u fazi testiranja.

### 4.1. Transport vodika cestom i željeznicom

Vodik se može transportirati kao plin, ali i kao tekućina. U oba slučaja koriste se specijalni cilindrični spremnici u kojima se vodik na siguran način skladišti i transportira do krajnjeg potrošača. Kada se vodik transportira u plinovitom stanju koriste se bešavni spremnici različitih volumena otporni na tlak. Spremnici manjeg volumena, od 50 do 150 L, su klasični industrijski spremnici, a spremnici volumena većeg od 150 L koriste se za transport vodika kamionima na veće udaljenosti. Uobičajena praksa je da se više spremnika poveže u snop koji se postavlja na prikolicu za transport vodika od mjesta punjenja do krajnjeg korisnika gdje se vrši zamjena praznih i punih spremnika. Na prikolici se najčešće nalazi devet spremnika svaki volumena od 2 000 L, i tlaka punjenja između 18 i 25 MPa (slika 4-1.).



**Slika 4-1.** Kamion za transport vodika u plinovitom stanju (Alamy, 2011)

Iako je ukapljivanje vodika izrazito energetski intenzivan proces, transport tekućeg vodika nameće se kao glavna opcija kada je riječ o transportu na srednje i velike udaljenosti. Transport tekućeg vodika prikolicama sa cilindričnim spremnikom reguliran je posebnim nacionalnim i internacionalnim propisima, s obzirom da se radi o transportu velikih količina zapaljivog plina te zbog tehničkih izazova koji se javljaju u tom procesu. Spremnici za transport ukapljenog vodika najčešće su kapaciteta između 20 000 i 50 000 L ili do 4 000 kg tekućine, dok je tlak u rasponu od 0,6 do 1 MPa, a temperatura  $-253^{\circ}\text{C}$  (slika 4-2.). Tijekom planiranja rute za transport vodika, treba izbjegavati naseljena područja te ostavljanje spremnika u blizini drugih spremnika s opasnim tvarima. Prilikom prijenosa tekućeg vodika iz spremnika s prikolice na krajnju lokaciju može doći do stvaranja bljeska, zbog postojanja velike razlike u temperaturi okoline i one u spremniku, što može uzrokovati ozljede ljudi i oštećenje opreme koja se nalazi u blizini.



**Slika 4-2.** Kamion za transport tekućeg vodika (Air Liquide, 2021)

Tekući vodik se osim u spremnicima na prikolicama može transportirati i željeznicom u spremnicima istih dimenzija što je vrlo čest način transporta ukapljenog vodika u svijetu.

#### 4.2. Transport vodika brodovima

Oceanski transport vodika brodovima proučava se od 1980-ih godina. Cilj svih provedenih studija bio je osmisliti učinkovit koncept transporta vodika na duge udaljenosti od lokacija gdje se vodik jeftino proizvodi do područja potražnje. Kao glavni zaključak studija nametnuo se koncept transporta tekućeg vodika, bez obzira na veliki utrošak energije u fazi ukapljivanja.

Prva velika studija o oceanskom transportu vodika provedena je u sklopu „Euro-Quebec Hydro-Hydrogen Pilot“ projekta, većinski financiranog od Europske komisije i vlade Quebeca. Generalna ideja bila je pretvorba viška jeftine i teško skladištene električne energije proizvedene u Quebec-u u oblik energije kojim bi se lakše upravljalo, kao što je vodik, te transport tako dobivenog vodika brodovima u područja velike potražnje, što je u ovom slučaju bila Njemačka. Novodizajnirani brod mogao bi prenositi 15 000 m<sup>3</sup> tekućeg vodika, skladištenog unutar pet izoliranih posuda (engl. *superinsulated vessels*). Projekt je obustavljen prije faze izgradnje broda zbog prevelikih troškova.

Druga studija provedena je od strane Japanske vlade. „World Energy Network“ (WE-NET) projekt, između ostalog, bavio se i dizajniranjem tankera za transport tekućeg vodika kapaciteta sličnog LNG tankeru, približno 200 000 m<sup>3</sup>. Predložene su opcije sferičnog i

prizmatičnog skladišnog prostora te jednostrukog ili dvostrukog dna. S obzirom da je vodik i u tekućoj fazi veoma lagan, a kako bi se garantirala stabilnost broda, nužna je konstrukcija s dvostrukim dnom za tankere koji prenose tekući vodik.

Proteklih godina, posebno zbog eksplozije nuklearke Fukushima, u Japanu se javila potreba za intenzivnijim istraživanjem i razvojem infrastrukture za aktivno korištenje vodika kao primarnog izvora energije. Novi projekt (engl. *Hydrogen Energy Supply Chain - HESC*), pod vodstvom „Hydrogen Energy Supply-chain Technology Research Association“ (HySTRA), usmjeren je ka tehnološkom razvoju energetskeg lanca opskrbe, bez emisija CO<sub>2</sub>, koji omogućuje ekonomičnu i pouzdanu proizvodnju vodika u velikim količinama (Kawasaki Heavy Industries, Ltd, 2019). Projekt se sastoji od dvije faze, pilot faze u trajanju od jedne godine koja je završila do 2020. godine i komercijalne faze koja, ukoliko se odluči realizirati, neće početi prije 2030. godine (The Environment Victoria, 2018). Kao jedan od ciljeva projekta, krajem 2019. godine „Kawasaki Heavy Industries“ predstavili su prvi svjetski tanker za tekući vodik, „Suiso Frontier“ (slika 4-3.). Tanker je dugačak 116 m i opremljen je s vakuumski izoliranim spremnikom s dvostrukom stijenkom koji može skladištiti 1 250 m<sup>3</sup> tekućeg vodika. Vodik je komprimiran na 1/800 svojeg volumena i ohlađen na -253°C kako bi se spriječilo istjecanje kroz stijenke spremnika jer vodik, zbog jako malih molekula, na višim temperaturama može doslovno prolaziti kroz praznine u atomskoj strukturi metalnog spremnika (New Atlas, 2019).





**Slika 4-3.** „Suiso Feontier“, brod za transport tekućeg vodika (Kawasaki Heavy Industries, Ltd, 2019)

Osim izgradnje tankera (slika 4-3), projektom je predviđena izgradnja terminala za istovar ukapljenog vodika u gradu Kobe-u, Japan, te postrojenje za uplinjavanje smeđeg ugljena, tj. lignita u saveznoj državi Viktoriji u Australiji koje je prikazano na slici 4-4 (Kawasaki Heavy Industries, Ltd, 2019).

U sklopu pilot projekta predviđena je obrada oko 160 000 kg lignita, čime bi se dobilo 3 000 kg vodika koji će se kamionima prevoziti u 150 km udaljenu luku u gadu Hastings-u, gdje će se ukapljivati i tankerom pognojenim dizel-električnim motorima transportirati u Japan. Shema cijelog projekta prikazana je na slici 4-5. Proizvodnja 3 000 kg vodika rezultira ispuštanjem oko 100 000 kg CO<sub>2</sub> i to ne uključuje emisije nastale kopnenim i pomorskim transportom. Također, u periodu između dvije faze projekta, postrojenja za uplinjavanje i ukapljivanje bi trebala biti sanirana (The Environment Victoria, 2018).



**Slika 4-4.** Rudnik lignita, Loy Yang, Viktorija, Australija (The Environment Victoria, 2018)



**Slika 4-5.** Shema HESC projekta (Kawasaki Heavy Industries, Ltd, 2019)

### 4.3. Transport vodika cjevovodima

Industrijsko iskorištavanje vodika započelo je 1938. godine izgradnjom cjevovoda za transport vodika namijenjenog za povezivanje nekoliko kemijskih postrojenja smještenih u Rurskom bazenu, Njemačka. U godinama koje su dolazile, pa sve do danas, razvijala se tehnologija izgradnje cjevovoda za transport vodika te je mreža takvih cjevovoda postajala sve dulja. Danas se najduža europska mreža cjevovoda za transport vodika, duljine oko 1 500 km, nalazi u zapadnoj Europi, a većinski prolazi teritorijem Francuske, Njemačke i zemljama Beneluksa. (Gerboni, 2016). Također, neke države, kao što su Velika Britanija i Švedska,

posjeduju cjevovode za transport vodika manjih duljina. Bez obzira na rani početak razvoja tehnologije, standardi i pravilnici za transport vodika cjevovodima nisu dovoljno ujednačeni i rašireni. Puno je takvih pravilnika lokalnog karaktera koji nisu standardizirani za opću primjenu te se koriste kako bi se zadovoljile potrebe pojedinih država, kao na primjer SAD. Europska Unija je pokrenula niz inicijativa za rješavanje sigurnosnih pitanja i razvoja općih pravilnika za izgradnju i korištenje cjevovoda za transport vodika, na temelju iskustva stečenog pri radu s prirodnim plinom.

Postojeći cjevovodi za transport vodika izgrađeni su od čelika. Raspon radnog tlaka unutar cjevovoda varira ovisno o mreži i obično je u rasponu od 0,34 do 10 MPa, dok je raspon unutarnjih promjera cjevovoda od 0,01 do 0,3 m. Najčešće su to vrijednosti radnog tlaka od 1 do 2 MPa i unutarnjeg promjera od 0,25 do 0,3 m. Efekt povećanja krutosti materijala cjevovoda se smanjuje ako unutarnji radni tlak ostane nizak. Kako bi se izbjegle prekomjerne financijske investicije, postoji mogućnost miješanja vodika s prirodnim plinom i na taj način iskorištavanja postojeće infrastrukture za transport, odnosno mreže plinovoda za transport prirodnog plina. Čelik koji se obično koristi za izgradnju plinovoda može se i dalje koristiti bez straha od nastanka opasnosti prilikom transporta smjese vodika i prirodnog plina, sve dok je udio vodika u smjesi manji od 20%.

Trenutno su dvije najveće svjetske kompanije koje se bave transportom vodika Air Liquide (Francuska) i Air Products (SAD) te se većina cjevovoda za transport vodika nalazi u njihovom vlasništvu. Ostale kompanije upravljaju malim mrežama cjevovoda unutar svojih proizvodnih pogona ili dijele kraće dionice cjevovoda od nekoliko kilometara. Gotovo uvijek, vodik se transportira u velika kemijska postrojenja ili rafinerije. Transport vodika do stambenih potrošača još uvijek nije dovoljno razvijen te je zastupljen u maloj količini, ali provode se intenzivna istraživanja kako javno omogućiti iskorištavanje energije dobivene iz vodika. Neki specifični obrtnički centri, kojima je vodik nužan u procesu proizvodnje, na primjer zlatarske radionice, počeli su razvijati lokalne mreže cjevovoda kako bi opskrbili svoja postrojenja s vodikom.

Predviđa se da će najveća potreba za cjevovodima za transport vodika biti u svrhu spajanja stanica za punjenje automobila te izgradnje mreže cjevovoda kao alternative za

skladištenje energije i opskrbu zasebnih kućanstava u urbanim sredinama, čime bi se stvorila konkurencija metanu.

## 5. PRENAMJENA POSTOJEĆIH PLINOVODA I NAFTOVODA U CJEVOVODE ZA TRANSPORT VODIKA

Kako bi se proveo proces izdvajanja vodika iz prirodnog plina mora postojati postrojenje za izdvajanje vodika. Ukoliko se radi o „plavom vodiku“ (engl. *blue hydrogen*) kod kojeg je nužno zbrinjavanje nastalog CO<sub>2</sub>, potrebno je skladište za utiskivanje neželjenog CO<sub>2</sub> nastalog reakcijom prirodnog plina i vode (Petrofac, 2022), zatim iskorišteno ležište ili kaverna za podzemno skladištenje vodika, pristup cjevovodu za transport vodika do željene lokacije i potencijalno privremeno površinsko skladište vodika povezano s transportnim sustavom.

Srednja do velika postrojenja za izdvajanje „plavog vodika“, koja koriste proces s reakcijom prirodnog plina i vodene pare uz dodatno zagrijavanje i katalizator kako bi se izdvojio ugljikov monoksid (CO), ugljikov dioksid (CO<sub>2</sub>) i vodik (engl. *steam methane reforming – SMR*) (Air Liquide, 2022), zahtijevaju pristup podzemnom skladištu u blizini postrojenja u koje će se utiskivati višak proizvedenog vodika. Mala postrojenja za izdvajanje „plavog vodika“ ne zahtijevaju podzemno skladište, nego se višak proizvedenog vodika može skladištiti na površini u privremenim skladišnim spremnicima prije nego ga se utisne u transportni sustav.

Kako je već navedeno, vodik se može transportirati kamionima u plinovitom ili tekućem stanju u specijalnim spremnicima na manje ili veće udaljenosti ili cjevovodima neovisno o udaljenosti. Međutim visoki troškovi izgradnje novih cjevovoda namijenjenih samo za transport vodika predstavljaju veliki problem širenju infrastrukture za transport vodika. Zato postoji nekoliko predloženih rješenja tog problema:

- prilagođavanje dijelova postojećih plinovoda za transport vodika;
- miješanje prirodnog plina i vodika te transport takve smjese postojećim plinovodima uz moguće manje prilagodbe infrastrukture i
- prenamjena postojećih plinovoda, naftovoda ili cjevovoda za transport derivata u cjevovode za transport vodika, što će zahtijevati značajne izmjene infrastrukture.

Prenamjena postojećih cjevovoda uključuje izmjenu kompresora, ventila, brtvi, brojila i drugih dijelova sustava, zamjenu segmenata cjevovoda ili popravljivanje zavarenih spojeva materijalima kompatibilnim za transport vodika, izmjenu sustava za otkrivanje propuštanja cjevovoda te instalaciju novih kontrolnih uređaja za praćenje i upravljanje protoka. U SAD-u

postoje barem dva primjera takve prenamjene. Kompanija Air Liquide je 1990-tih kupila dva naftovoda u Teksasu te ih uspješno prenamijenila za transport vodika. Iako u prošlosti opisane prenamjene cjevovoda nisu bile učestale, u današnje vrijeme sve je više ideja o prenamjeni plinovoda za transport vodika i takav se pristup smatra učinkovitom strategijom razvoja infrastrukturne mreže za transport vodika.

SAD imaju dobro razvijenu mrežu plinovoda koja je ujedno najduža na svijetu duljine 1 984 321 km, a njome se svakodnevno transportiraju velike količine prirodnog plina (CIA, 2022). U tablici 5-1. prikazane su duljine plinovoda nekih država izražene u kilometrima. Postojeća mreža plinovoda prolazi kroz sve savezne države te povezuje na nekoliko mjesta SAD i Kanadu te SAD i Meksiko. Također, uz mrežu cjevovoda i prijelaze sa susjednim državama, na slici 5-1 prikazan je i veliki broj postojećih podzemnih skladišta prirodnog plina. Sve navedeno predstavlja dobre preduvjete za razvoj infrastrukturne mreže za transport vodika, tj. prenamjenu postojećih plinovoda. Trenutno u SAD-u postoji oko 2 500 km cjevovoda za transport vodika koji su većinom smješteni u blizini velikih potrošača vodika, kao što su rafinerije i kemijska postrojenja (Ehlig-Economides i Hatzignatiou, 2021).

**Tablica 5-1.** Deset najduljih mreža plinovoda u svijetu (CIA, 2022.)

Država	Duljina plinovoda (km)
SAD	1 984 321
Rusija	177 700
Kanada	110 000
Kina	76 000
Ukrajina	36 720
Australija	30 054
Argentina	29 930
Velika Britanija	28 603
Njemačka	26 985
Italija	20 223



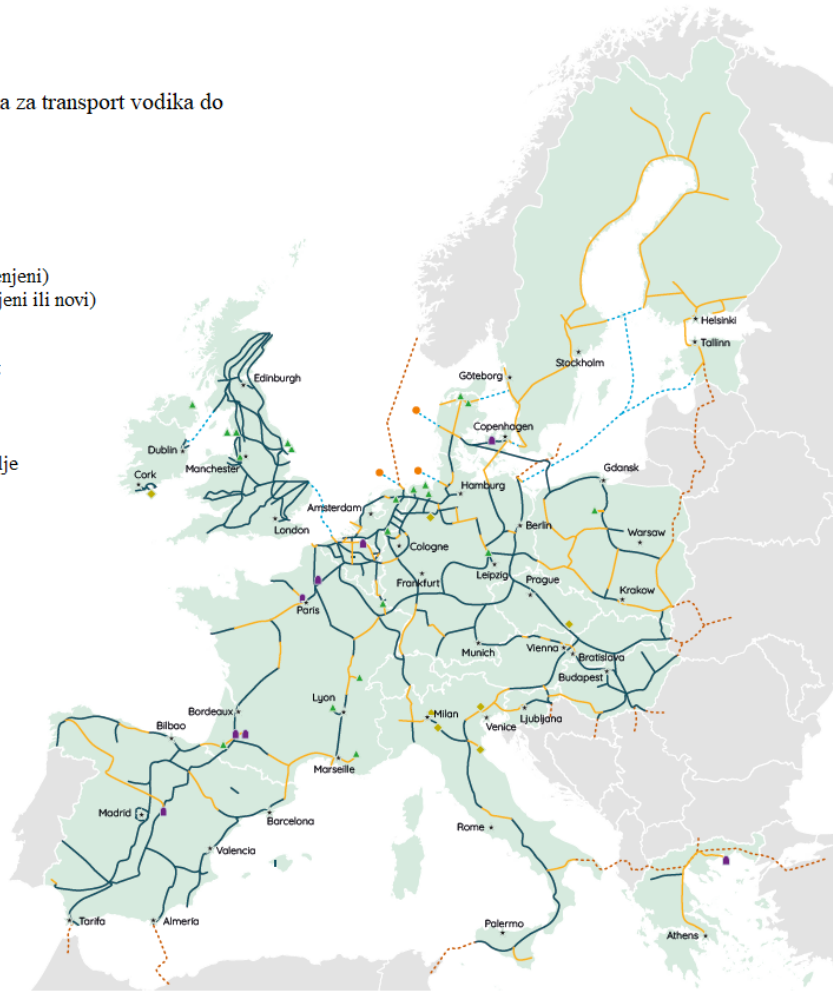


**Slika 5-1.** Mreža plinovoda u SAD-u s prikazanim interkonekcijama s Kanadom i Meksikom te podzemnim skladištima plina (Ehlig-Economides i Hatzignatiou, 2021)

U Europi je dvanaest velikih kompanija iz jedanaest država, koje se bave transportom prirodnog plina, predložilo prenamjenu velikog dijela kontinentalne mreže plinovoda kako bi se uspostavila konkretna mreža cjevovoda za transport vodika u većini država zapadne i srednje Europe, tzv. „European Hydrogen Backbone“. Predložena je mreža duljine 39 700 km cjevovoda za transport vodika koja bi prolazila kroz 21 državu i bila izgrađena do 2040. godine, s mogućnošću dodatnog širenja. Dvije trećine mreže činila bi postojeća infrastruktura za transport prirodnog plina uz određene preinake, dok bi jedna trećina bila bi u potpunosti izgrađena isključivo za transporta vodika. Predviđena ulaganja u cijeli projekt iznose između 43 i 81 bilijuna eura s prosječnom cijenom transporta vodika na 1 000 km od 0,11 do 0,21 eura po kilogramu vodika, čineći tako projekt financijski isplativ kao opciju za transport vodika na veće udaljenosti (Jens et al., 2021). Predložena shema mreže cjevovoda za transport vodika prikazana je na slici 5-2.

Predviđeni izgled mreže cjevovoda za transport vodika do 2040. godine

- H<sub>2</sub> cjevovodi (prenamijenjeni)
- H<sub>2</sub> cjevovodi (novo izgrađeni)
- H<sub>2</sub> cjevovodi za uvoz/izvoz (prenamijenjeni)
- H<sub>2</sub> cjevovodi, podzemski (prenamijenjeni ili novi)
- Države uključene u projekt
- Države koje nisu uključene u projekt
- ▲ Moguće skladište H<sub>2</sub>: solne dome
- Moguće skladište H<sub>2</sub>: akvifer
- ◆ Moguće skladište H<sub>2</sub>: iskorišteno polje
- Otoki za „offshore“ proizvodnju H<sub>2</sub>
- \* Gradovi



Slika 5-2. „European Hydrogen Backbone“ (Jens et al., 2021)

Tehnički problemi koji se moraju razmotriti kod prenamjene cjevovoda uključuju:

- potencijalnu opasnost od ulaska atoma vodika unutar strukture čeličnog cjevovoda ili zavarenih spojeva čime im se može narušiti stabilnost odnosno povećati krtost;
- moguće propuštanje vodika kroz stijenke cjevovoda i istjecanja vodika;
- sigurnosni zahtjevi i
- provjeru pouzdanosti i trajnosti kompresora.

Materijal od kojeg su izgrađeni cjevovodi za transport vodika ovisi prije svega o kvaliteti vodika koji se transportira. Ako je vodik čist i bez vlage, nema pojave korozije te nije potrebna dodatna obrada unutrašnjosti cjevovoda. Međutim, ako vodik sadrži određeni postotak vlage ili



druge komponente koje mogu izazvati koroziju, unutarnje stijenke cjevovoda moraju biti zaštićene zaštitnim slojem i/ili posebnim antikorozivnim premazima. Kada vodik sadrži amonijak moraju se izbjegavati materijali koji sadrže bakar, legure bakra, cink i kositar jer mogu korodirati. Uobičajeno je da se za izradu sekcija cjevovoda, spojeva i posebnih dijelova koristi čelik s malim postotkom ugljika, kako bi se izbjegla krtost cjevovoda (engl. *embrittlement*), kaljeni čelik ili polimeri ojačani vlaknima gdje su troškovi ugradnje takvih cjevovoda oko 20% niži nego kod ugradnje čeličnih cjevovoda.

Pojava krtosti je vrsta oštećenja koja nastaje kada atomi vodika uđu u strukturu metala od kojeg je građen cjevovod. Ovisno o kvaliteti čelika i radnim uvjetima, takva pojava može izazvati smanjenje čvrstoće cjevovoda i dovesti do rasta postojećih pukotina čime se smanjuje vijek trajanja cjevovoda ili nekog njegovog dijela. Ova pojava se rijetko javlja tijekom normalnog rada cjevovoda, jer rijetko dolazi do kolebanja tlakova na stijenkama cjevovoda. Ipak, ne može se zanemariti mogućnosti razbijanja molekula vodika tijekom transporta te tako stvaranja slobodnih atoma vodika na stijenkama koji bi mogli prouzročiti oštećenja. Kako bi se na vrijeme uočila i otklonila opasnost od utjecaja slobodnih vodikovih atoma na svojstva cjevovoda, pristupa se periodičkim testovima provjere i čišćenja unutrašnjosti cjevovoda korištenjem čistača. Čistači cjevovoda za transport vodika su zapravo prilagođeni čistači plinovoda. Smatra se da značajno smanjenje vijeka trajanja cjevovoda zbog utjecaja vodika nije vjerojatno, ali se moraju provesti daljnja ispitivanja o potrebi prilagođavanja radnih uvjeta za određene vrste čelika (Adem i Energy, 2021).

Kako bi se smanjila mogućnost ispuštanja vodika iz cjevovoda, gdje je moguće, spojna mjesta na cjevovodu ne bi smjela biti zavarena. Materijali poput polietilena velike gustoće (HDPE) ili polivinil-klorida (PVC) ne koristite se, jer su preporozni i neprikladni za transport vodika. Obzirom da je vodik bezbojan i bez mirisa, umjesto dodavanja odoranta koji izaziva niz problema i neprikladan je za korištenje (potrebna velika količina, predstavlja problem kod separacije i smanjuje reaktivnost katalizatora kod kemijskih reakcija), koriste se sprejevi za premazivanje koji mijenjaju boju kada su u kontaktu s minimalnom količinom vodika.

Cjevovod određenog promjera i pada tlaka koji transportira vodik, koji je lakši i manje viskozan od prirodnog plina, za transport iste količine energije zahtijevati će znatno veći tlak ili brzinu protjecanja. To znači da isti cjevovod može transportirati veću količinu energije u obliku

prirodnog plina nego u obliku vodika. Veća brzina protjecanja u cjevovodu povećat će gubitak energije uzrokovan trenjem o stijenke cjevovoda te će također stvoriti određene probleme pri određivanju maksimalne brzine protjecanja, zbog moguće erozije cjevovoda transportiranim česticama, pogotovo kod prenamjene starijih plinovoda. Veći tlak u cjevovodu zahtijeva veću kompresiju vodika i više kompresora, što predstavlja problem s obzirom na povezane troškove zbog potrebne veće debljine stijenke i većih promjera cjevovoda, kao i samih kompresora. Kod prenamjene plinovoda u cjevovod za transport vodika maksimalni radni tlak je već definiran i ne smije ga se prekoračiti. Stoga će odabir radnog tlaka cjevovoda biti će ključan kod prenamjene i transporta vodika. Međutim, cjevovodi za transport vodika nisu toliko dugi kao plinovodi te se osim kompresorske stanice na postrojenju za izdvajanje vodika i one na izlazu iz cjevovoda, rijetko javlja potreba za rekompresijom. Ako ipak postoji potreba za dodatnim kompresorima, manji gubici tlaka kod transporta vodika omogućuju da razmak između njih bude veći. Trošak transporta vodika cjevovodima je otprilike za 1,5 do 1,8 puta veći od troška transporta prirodnog plina (Ehlig-Economides i Hatzignatiou, 2021).

Cjevovodi koji se koriste za transport vodika visokog stupnja čistoće trebali bi biti napravljeni od čelika koji je manje sklon prodoru vodika u njegovu strukturu pod visokim tlakom. Jedna njemačka komunalna kompanija najavila je 2021. pilot projekt prenamjene srednje-tlačnog plinovoda u cjevovod za transport vodika velike čistoće ka maloj skupini industrijskih kupaca za namjenu grijanja prostora koristeći modificirane bojlere. Studije izrađene za procjenu učinkovitosti prenamjene plinovoda u cjevovode za transport vodika navode potencijalne ekonomske i razvojne prednosti. Analiza provedena na njemačkoj mreži cjevovoda pokazala je kako bi prenamjena postojećih plinovoda u cjevovode za transport vodika smanjila troškove transporta za 20 do 60% u odnosu na izgradnju novih cjevovoda. Takve prenamjene mogle bi omogućiti razvoj tržišta vodika uz ograničena kapitalna ulaganja, čime bi se izbjegao problem u kojem početna potražnja za vodikom ne može financijski poduprijeti u odgovarajućoj mjeri velike projekte izgradnje cjevovoda. Također, takva prenamjena funkcije plinovoda mogla bi smanjiti rizik od propadanja i obezvrjeđenja postojećih plinovoda zbog smanjenja potrebe za transportom prirodnog plina nastale rastom potražnje za vodikom i obnovljivim izvorima energije te zahtjevima za smanjenjem emisija metana. Upravo iz tih razloga lokalni operateri u SAD-u sve više razmatraju opciju prenamjene plinovoda. Naposljetku, prenamjena koja se događa u postojećem koridoru cjevovoda poželjnija je od

projektiranja novih trasa prolaska cjevovoda, jer to predstavlja dugotrajan proces koji uz sebe veže razne regulatorne i pravne izazove.

Bez obzira na potencijalne prednosti prenamjene postojećih plinovoda, osim tehničkih pitanja koja bi trebalo riješiti za novoizgrađene cjevovode za opskrbu vodikom, takva će se inicijativa i dalje suočavati sa znatnim tržišnim nesigurnostima i logističkim izazovima povezanim s potražnjom vodika.

Jedna od opcija za transport vodika je i miješanje vodika s prirodnim plinom te transport takve smjese postojećim plinovodima uz minimalne nadogradnje. Takav proces zahtijeva odvajanje vodika iz smjese na izlazima iz transportnog sustava i njegovo pročišćavanje što predstavlja dodatne troškove. Postoje tri učestale metode separacije vodika, na izlazu iz cjevovoda, iz smjese s prirodnim plinom: adsorpcija promjenom tlaka (engl. *pressure swing adsorption* - PSA), membranska separacija i elektrokemijska separacija vodika (engl. *electrochemical hydrogen separation* - EHS). PSA postupak se koristi kod malih koncentracija vodika u smjesi. Membranska separacija je učinkovita kod smjesa s velikim udjelom vodika i ne zahtijeva visoki stupanj čistoće vodika, ali razrijeđeni vodik predstavlja probleme jer je potrebna veća razlika tlaka preko membrane. EHS je novija metoda u odnosu na PSA i membransku separaciju te predstavlja složeniji postupak povratka vodika iz smjese sa prirodnim plinom. Kod transporta smjese vodika i prirodnog plina određene opasnosti i problemi su izraženiji nego kod transporta samog prirodnog plina. Vodik ima šire područje eksplozivnosti te se zbog toga povećava opasnost od zapaljenja i oštećenja infrastrukture kod transporta smjese s prirodnim plinom. Također, postoji utjecaj na točnost mjernih uređaja i stabilnost stijenki cjevovoda koje su izložene vodikom pod visokim tlakom duži vremenski period. Kod cjevovoda napravljenih od čelika i lijevanog željeza, mjerenja količine propuštanja pokazala su da je količina ispuštenog vodika gotovo tri puta veća od količine prirodnog plina.

## **6. PRIMJER ANALIZE PRENAMJENE INFRASTRUKTURNE MREŽE PLINOVODA ZA TRANSPORT VODIKA U NJEMAČKOJ**

Trenutna tranzicija energetske sustava s ciljem smanjenja emisija stakleničkih plinova zbog korištenja fosilnih izvora s jedne strane i globalni razvoj infrastrukture vezane uz korištenje prirodnog plina s druge strane, uzroci su neizvjesnosti oko buduće uloge prirodnog plina i s njim povezane infrastrukture u energetske sustavu. Jedno od mogućih rješenja je prenamjena cjevovoda za transport prirodnog plina u one za transport vodika. Cerniauskas et al. (2020) analizirali su mogućnost prenamjene postojeće njemačke mreže plinovoda u cjevovode za transport vodika zbog toga što transport vodika postojećim cjevovodima na velike udaljenosti smanjuje cijenu infrastrukture tijekom početne faze izgradnje. U skladu s tim, razmotrene su četiri opcije za prenamjenu postojećih plinovoda te je provedena usporedba ekonomske isplativosti prenamjene postojećih plinovoda na nacionalnoj razini s transportom vodika kamionima, u plinovitom ili tekućem stanju te s novoizgrađenim cjevovodima za transport vodika.

Tehnička održivost prenamijenjenih cjevovoda ovisi o kontroli nastanka oštećenja cjevovoda pod utjecajem vodika te omogućavanju sigurne isporuke vodika. Uzrok nastanku pukotina izazvanih protokom vodika jest ulazak vodika u kristalnu strukturu čelika od kojeg je cjevovod građen, čime dolazi do smanjenja mehaničkih svojstva materijala. Temeljem toga, navedene su četiri opcije prenamjene cjevovoda za transport vodika:

- korištenje postojećih plinovoda uz male modifikacije;
- dodavanje plinovitih inhibitora u vodik;
- premazivanje površina cjevovoda koje su u izravnom kontaktu s vodikom i
- ugradnja cjevovoda manjeg promjera za transport vodika, unutar postojećeg cjevovoda.

Također je, kao problem ustanovljen nedovoljan broj regulatornih propisa o korištenju prenamijenjenih cjevovoda, pa bi stoga ovakav projekt trebalo prvo provesti unutar industrijske zone ili u bliskoj suradnji sa regulatornim agencijama. Kao drugi, bitniji problem, utvrđeno je da vodik nije transportiran pod visokim tlakom cjevovodima promjera većeg od 0,3 m. To predstavlja problem, jer većina plinovoda u Njemačkoj ima promjer u rasponu od 0,5 do 1,4 m.

Svaka od navedenih opcija prenamjene ima svoje prednosti i nedostatke koji su prikazani u tablici 6-1.

**Tablica 6-1.** Prednosti i nedostaci pojedinih opcija prenamjene plinovoda (Cerniauskas et al., 2020)

Opcije prenamjene	Prednosti	Nedostaci
Korištenje postojećih plinovoda uz male modifikacije	- potrebne male izmjene - ograničeno stvaranje pukotina pod statičkim opterećenjem	- povećano trošenje materijala
Dodavanje plinovitih inhibitora u vodik	- potrebne su male izmjene - zaštitni sloj koji sprječava prodor H <sub>2</sub> u strukturu cijevi	- toksičnost inhibitora i pojava sigurnosnih rizika - dodatno čišćenje vodika
Premazivanje površina u izravnom kontaktu s vodikom	- posebna zaštita od prodora H <sub>2</sub> - razvijen proces zaštite metalnih površina	- nepostojanje „on-site“ procesa za zaštitu već ugrađenih cjevovoda - potrebno iskapanje cjevovoda
Ugradnja cjevovoda manjeg promjera u postojeći cjevovod	- kombinacija dobrih svojstava vanjskog i unutarnjeg cjevovoda	- potreba za dodatnim materijalom/cjevovodom - potrebno iskapanje cjevovoda

Opcije koje uključuju premazivanje površina u izravnom kontaktu s vodikom i ugradnju dodatnog cjevovoda unutar postojećeg su odbačene prvenstveno zato što je ustanovljeno da će zahtijevati iskapanje postojećeg cjevovoda što će značajno povećati troškove prenamjene.

Nadalje, autori su razmotrili kapitalne (CAPEX) i operativne (OPEX) troškove koje bi zahtijevala pojedina opcija prenamjene. Kod prve opcije, prenamjene cjevovoda uz male modifikacije, zaključeno je da neće biti kapitalnih troškova za sam cjevovod, ali će biti potrebno instalirati nove kompresore i stanice za regulaciju tlaka plina (engl. *gas pressure regulation stations*) koje su kompatibilne za rad s vodikom. Kako će primjenom ove opcije prenamjene s vremenom doći do povećanog trošenja materijala, većina operativnih troškova pridružena je održavanju i popravcima cjevovoda. Također, određena je okvirna udaljenost od 250 km između svakog instaliranog kompresora ili stanice za regulaciju tlaka te ulazni radni tlak cjevovoda u

rasponu od 7 do 10 MPa. Prije je zaključeno da je čelik kvalitete X70 zadovoljavajućih karakteristika za transport vodika. U slučaju druge opcije, dodavanja plinovitih inhibitora u smjesu s plinovitim vodikom, uz CAPEX i OPEX prve opcije, postoje dodatni kapitalni troškovi u vidu postrojenja za pročišćavanje vodika iz smjese s inhibitorima na izlazu iz cjevovoda te dodatnog kompresora koji će smanjivati minimalni tlak od 7 MPa na izlazu iz cjevovoda na tlak od 4 MPa na izlazu iz postrojenja za pročišćavanje. Dodatni operativni troškovi vezani su uz dodavanje inhibitora te rad i održavanje postrojenja za pročišćavanje i povezane kompresorske stanice. Također, analizirane su potrebne količine tri različita inhibitora (kisik, ugljikov monoksid i sumporov dioksid) za smanjenje utjecaja prodora vodika u strukturu čelika te pripadajući troškovi njihove primjene, gdje nisu uračunati troškovi recikliranja i odlaganja inhibitora. Iz analize je vidljivo da je za isti učinak potrebna znatno manja koncentracija kisika (O<sub>2</sub>), odnosno svega 0,015%, u odnosu na potrebne koncentracije ugljikovog monoksida (CO) i sumpornog dioksida (SO<sub>2</sub>) od 2%. Razmjerno je i cijena korištenja kisika kao inhibitora znatno manja.

Nakon analize troškova vezanih uz pojedinu opciju prenamjene cjevovoda za transport prirodnog plina te usporedbom s potrebnim radnim tlakom, kvalitetom materijala, brojem paralelnih cjevovoda te starosti postojećih plinovoda u infrastrukturnoj mreži Njemačke, donesen je zaključak o udjelu duljine postojećih plinovoda koji su pogodni za prenamjenu u cjevovode za transport vodika u odnosu na ukupnu duljinu postojećih cjevovoda. Plinovodi su klasificirani u one koji su pogodni i one koji nisu pogodni za prenamjenu temeljem potrebnog minimalnog radnog tlaka cjevovoda većeg do 7 MPa i kvalitete čelika X70 (tablica 6-2). Da bi se plinovod okarakterizirao pogodan za prenamjenu moraju biti zadovoljena oba uvjeta.

**Tablica 6-2.** Klasifikacija plinovoda pogodnih za prenamjenu (Cerniauskas et al., 2020)

	Broj linija	Radni tlak	Kvaliteta materijala	Ukupne duljine mreže	Ukupna duljina
Plinovodi pogodni za prenamjenu	1	> 7 MPa	X70	42,96%	81,9%
	2	> 7 MPa	X70	25,89%	
	3	> 7 MPa	X70	13,11%	
Plinovodi koji nisu pogodni za prenamjenu	1	< 7 Mpa	X60	10,72%	18,00%
	1	< 7 Mpa	X70	0,90%	
	1	> 7 MPa	X60	0,17%	
	2	< 7 MPa	X70	1,41%	
	2	> 7 MPa	X60	2,44%	
	3	> 7 MPa	X60	2,40%	

Iz podataka je vidljivo da kvaliteta čelika nije limitirajući parametar, budući da je skoro 85% ukupne mreže plinovoda izgrađeno od čelika kvalitete X70 te da je 87% plinovoda dostupno za

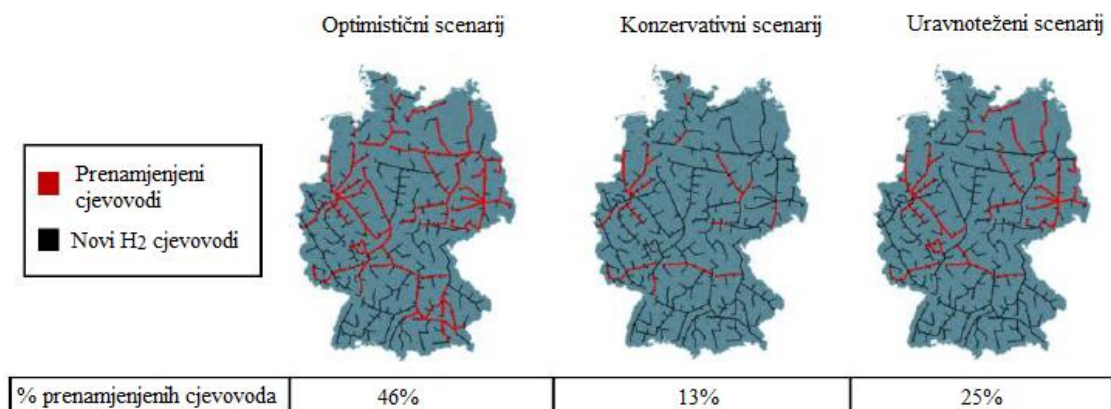
prenamjenu s obzirom da imaju zadovoljen uvjet o minimalnom radnom tlaku od 7 MPa. Znatnu ulogu u određivanju dostupnosti postojećih plinovoda za prenamjenu ima broj paralelnih linija, jer od ukupnog broja plinovoda koji zadovoljavaju uvjete o kvaliteti materijala i minimalnom radnom tlaku više od 50% njih ima samo jednu liniju plinovoda, što u slučaju potreba za nastavkom transporta prirodnog plina, smanjuje potencijal za prenamjenu na 39% ukupne duljine mreže plinovoda.

Iz usporedbe ukupnog godišnjeg troška cjevovoda za svaku pojedinu opciju prenamjene i novoizgrađenog cjevovoda za transport vodika, autori su zaključili da nisu sve opcije prenamjene jeftinije rješenje od izgradnje potpuno novog cjevovoda. Štoviše, korištenje CO i SO<sub>2</sub> inhibitora predstavlja najskuplje opcije. Značajno manji trošak pri upotrebi O<sub>2</sub> povezan je s malom cijenom inhibitora i potrebnim malim količinama koje posljedično smanjuju trošak pročišćavanja. Trošak prenamjene cjevovoda uz male modifikacije je zbog nepostojanja potrebe za pročišćavanjem isplativija opcija od korištenja O<sub>2</sub> inhibitora te zbog niskog CAPEX-a i fiksnog OPEX-a predstavlja barem za 60% jeftiniju opciju od izgradnje novog cjevovoda za transport vodika. No, zbog ograničene dostupnosti cjevovoda za prenamjenu i poteškoća u povezivanju regionalnih centara s novim cjevovodima za transport vodika, smanjenje troškova prenamjenom cjevovoda u odnosu na njihovu izgradnju pada u raspon od 20 do 60%, ovisno o kombinaciji opcija prenamjene. Zaključeno je da je za cjevovode većih promjera (> 0,25 m) jedina ekonomski isplativa opcija prenamjena postojećeg plinovoda uz male modifikacije, dok u slučaju manjih promjera (< 0,25 m) isplativiju opciju predstavlja primjena inhibitora O<sub>2</sub>. No, zbog veće osjetljivosti na mogućnost slabe iskoristivosti cjevovoda te u slučaju potražnje veće od 500 kt godišnje, sustav s O<sub>2</sub> inhibitorima je ekonomski znatno skuplja opcija i od izgradnje novog sustava cjevovoda. To znači da je jedino opcija prenamjene postojećih plinovoda uz male modifikacije zadovoljila uvjete analize.

Kako bi kritički procijenili učinak dostupnosti plinovoda za prenamjenu, osmišljena su tri konkretna scenarija dostupnosti plinovoda koja se temelje na potražnji vodika u 2030. godini, a time je omogućena usporedba prostorne distribucije prenamijenjenih cjevovoda i povezanih troškova (slika 6-1.). Sva tri scenarija zadovoljavaju uvjet minimalnog tlaka i kvalitete materijala, a razlikuju se prema mogućnosti paralelnog transporta prirodnog plina i vodika kroz pojedine regije. Također, u obzir je uzeta i starost plinovoda kako bi se odredila isplativost

prenamjene takvih plinovoda u kombinaciji s izgradnjom novih za transport prirodnog plina u odnosu na izgradnju novih paralelnih cjevovoda za transport prirodnog plina i vodika.

U slučaju optimističnog scenarija prenamjene plinovoda, koji nije uvjetovan brojem paralelnih linija i starošću cjevovoda, vidljivo je da je 46% mreže za transport vodika sastavljeno od prenamijenjenih plinovoda čime se pokriva skoro cijeli transport u istočnoj Njemačkoj i glavne linije transporta iz vjetrom bogatih sjeverozapadnih regija do jugoistočnog dijela države. Jugozapadni dio Njemačke nije obuhvaćen analizom jer postojeći plinovodi ne zadovoljavaju potrebne kriterije tlaka i kvalitete materijala. U konzervativnom scenariju ukupni dio prenamijenjene mreže plinovoda iznosi 13%, zbog čega ovakav slučaj ima ograničeni utjecaj na smanjenje ukupnih troškova. Ovim scenarijem pokrivena je samo visoko industrijalizirana regija s opsežnom mrežom plinovoda na sjeverozapadu Njemačke. Zadnji, uravnoteženi scenarij je proširena verzija konzervativnog scenarija jer uključuje prenamjenu starih plinovoda te time nudi manje ograničavajuće rješenje s ukupno 25% prenamijenjene mreže za transport vodika. U ovom scenariju uključen je transport prema središtu Njemačke kao i dobra pokrivenost istočnih pokrajina.



**Slika 6-1.** Scenariji dostupnosti plinovoda za prenamjenu za 2030. godinu (Cerniauskas et al., 2020)

Uspoređujući troškove tri opisana scenarija sa sustavom potpuno novih cjevovoda za transport vodika, neovisno o kojem se scenariju radi, autori su zaključili da prenamjena postojećih cjevovoda smanjuje troškove transporta vodika za oko najmanje 20%. Točnije, optimistični scenarij, gdje je skoro polovica cjevovoda prenamijenjena, omogućuje smanjenje



troškova za 30%, konzervativni scenarij za 22%, a uravnoteženi scenarij za 25%. Troškovi transporta vodika za ta tri scenarija, izraženi u kn po kilovat-satu, kreću se u rasponu od 31 do 33 lipa/kWh (4,1 do 4,4 ct/kWh) i znatno su veći od trenutnih troškova transporta prirodnog plina u Njemačkoj, koji iznose od 3 do 9 lipa/kWh (0,33 do 1,25 ct/kWh) za industrijske i komercijalne potrošače. Istraživanja upućuju na zaključak da za odabrani scenarij, količina vodika koja će se transportirati cjevovodima do 2030. godine neće doseći količinu prirodnog plina koja se trenutno transportira postojećim cjevovodima.

Razlog limitiranog utjecaja prenamjene cjevovoda na ukupne troškove sustava je činjenica da troškovi proizvodnje vodika i izgradnje punionica predstavljaju 2/3 ukupnih troškova. Ove dvije komponente lanca opskrbe vodikom imaju tako značajan utjecaj na konačnu cijenu zbog varijabilnih troškova proizvodnje vodika, kojim upravlja cijena energenata iz kojih se vodik izdvaja, te niska iskorištenost kapitalno intenzivne mreže punionica vodikom.

## 7. ZAKLJUČAK

Cjevovodi koji se koriste za transport nafte i plina diljem svijeta, najzastupljenije su sredstvo kopnenog transporta tih energenata. Jednom kada cjevovodi dosegnu kraj svojeg radnog vijeka nužno je pristupiti postupku napuštanja cjevovoda i na taj način onemogućiti štetne utjecaje napuštene infrastrukture, na okoliš i ljude, koja u većini situacija ostaje na lokaciji na kojoj je prvotno i instalirana. Kako je napuštanje cjevovoda veliki financijski trošak te zbog svjetske politike smanjenja emisija stakleničkih plinova, pogotovo emisija nastalih proizvodnjom i korištenjem fosilnih goriva, i tranzicije na ekološki prihvatljivije izvore energije, jedna od poželjnijih alternativa napuštanju cjevovoda jest prenamjena istih, prije nego dosegnu kraj radnog vijeka. Jedna od mogućih opcija je prenamjena postojećih cjevovoda odnosno plinovoda i njihovo korištenje za transport vodika. Osim cjevovodima, vodik se danas transportira i željezničkim i cestovnim putem, bilo u plinovitom ili tekućem stanju, u posebno dizajniranim spremnicima, dok je transport brodovima još u fazi testiranja. Postoji nekoliko opcija za prenamjenu cjevovoda za transport vodika, a one uključuju kompletnu prenamjenu cjevovoda ili dijela cjevovoda uz male modifikacije što je ujedno i ekonomski najpristupačnija opcija, zatim, korištenje inhibitora u smjesi s vodikom te miješanje vodika s prirodnim plinom, do koncentracije od 20% vodika, i transport takvih mješavina postojećim plinovodima. Postupak miješanja vodika s inhibitorima ili prirodnim plinom je tehnički i financijski neisplativiji postupak jer zahtijeva dodatne mjere sigurnosti i postrojenje za pročišćavanje i izdvajanje vodika iz smjese prije nego bude spreman za korištenje. Različite analize su pokazale da je postupak prenamjene postojećih cjevovoda u svrhu transporta vodika uz male modifikacije isplativija opcija od izgradnje potpuno novog cjevovoda za transport vodika. No, zbog prevelikih troškova proizvodnje vodika i troškova izgradnje punionica te njihovog stupnja iskoristivosti, sama ušteda ostvarena prenamjenom cjevovoda nema preveliki značaj u konačnoj strukturi troškova. Trenutna infrastrukturna mreža cjevovoda za transport vodika u Europi sa svim popratnim uređajima i elementima nije dovoljna za učinkovitu i ekonomski isplativu širu primjenu vodika u javnom životu. Međutim, prema politici Europske Unije proizašle iz zelenog plana (engl. *EU green deal*), strategije za postizanje održivog gospodarstva EU pretvaranjem klimatskih i ekoloških izazova u prilike u svim područjima života do 2050. godine, može se očekivati sve veći poticaj EU ka razvoju tehnologije i infrastrukture za učinkovitiju, jeftiniju i

„zeleniju“ proizvodnju, skladištenje, transport i krajnju upotrebu vodika kao energenta kojim bi se u daljoj budućnosti zamijenio prirodni plin.

## 8. POPIS LITERATURE

1. ADEM, R., ENERGY, S., 2021. Opportunities and Challenges in Converting Existing Natural Gas Infrastructure for Hydrogen Operation – Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi
2. BUILD PROTECT d.o.o., 2022. Osnove zaštite od požara
3. CERNIAUSKAS, S., CHAVEZ JUNCO, A. J., GRUBE, T., ROBINIUS, M., STOLTEN, D., 2020. Options of Natural Gas Pipeline Reassignment for Hydrogen: Cost Assessment for a Germany Case Study
4. COLLBERG, L., LEINUM, B., HELGAKER, J. F., HUGAAS, B.-A., ØSTBY, E., LEVOLD, E., STRØMME, P. A., 2021. Hydrogen Transport in Offshore Pipelines – Identified Need for Code Extensions – 15th OMC Med Energy Conference and Exhibition in Ravenna, Italy
5. EHLIG-ECONOMIDES, C., HATZIGNATIOU, D. G., 2021. Blue Hydrogen Economy - A New Look at an Old Idea – 2021 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Abu Dhabi
6. GERBONI, R., 2016. Introduction to hydrogen transportation – Compendium of Hydrogen Energy, drugo izdanje: Hydrogen Storage, Transportation and Infrastructure. Woodhead Publishing Series in Energy
7. JENS, J., WANG, A., VAN DER LEUN, K., PETERS, D., BUSEMAN, M., 2021. Extending the European Hydrogen Backbone. Guidehouse.
8. JING, J., WANG, W., WU, D., LUO, J. ZENG, S., ZHENG, T., CHEN, H., 2021. Advances in Abandonment and Disposal Technology of Aging Oil and Gas Pipelines – SPE Symposium: Decommissioning and Abandonment – održano online od 30.11. do 02.12.2021. godine
9. PARFOMAK, P. W., 2021, Pipeline Transportation of Hydrogen: Regulation, Research, and Policy. Izvješće, Congressional Research Service.
10. PREWITT, TJ., FINNERAN, S., KAUFMAN, J., 2017. Long Term Structural Integrity Considerations for Abandoned Pipelines – NACE International Corrosion Conference & Expo 2017
11. REVIE, R. W., 2015. Oil and Gas Pipelines, Integrity and Safety Handbook. Hoboken, New Jersey, SAD

## Web izvori:

12. AIR LIQUIDE, 2022. Cryogenic Gases, proven expertise in supply of liquid gases.

URL: [Cryogenic gases – Air Liquide \(airliquide-expertisecenter.com\)](https://airliquide-expertisecenter.com) (26.01.2022.)

13. AIR LIQUIDE, 2022. Steam Methane Reforming – Hydrogen Production.

URL: [Steam Methane Reforming - Hydrogen Production | Air Liquide \(engineering-airliquide.com\)](https://engineering-airliquide.com) (26.01.2022.)

14. ALAMY, 2022. Hydrogen tanks. For fueling of hydrogen fuel cell vehicles. Mobile service station. High pressure gas bottle.

URL: [Hydrogen tanks. For fueling of hydrogen fuel cell vehicles. Mobile service station. High pressure gas bottle Stock Photo - Alamy](https://www.alamy.com) (26.01.2022.)

15. CANADA ENERGY REGULATOR (CER), 2022. Pipeline Decommissioning.

URL: [CER – Pipeline Decommissioning \(cer-rec.gc.ca\)](https://cer-rec.gc.ca) (12.01.2022.)

16. CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY (CIA), 2022. The World Factbook. Field Listing – Pipelines.

URL: <https://www.cia.gov/the-world-factbook/field/pipelines/> (03.02.2022.)

17. THE ENGINEERING TOOLBOX, 2021. Density and Specific Weight vs. Temperature and Pressure

URL: [https://www.engineeringtoolbox.com/density-specific-weight-gravity-d\\_290.html](https://www.engineeringtoolbox.com/density-specific-weight-gravity-d_290.html) (16.02.2022.)

18. THE ENVIRONMENT VICTORIA, 2018. Converting brown coal to hydrogen? The dirty details on another coal boondoggle.

URL: [Environment Victoria | Converting brown coal to hydrogen? The dirty details on another coal boondoggle](https://www.environment.vic.gov.au) (13.07.2018.)

19. KAWASAKI HEAVY INDUSTRIES, Ltd., 2019. World's First Liquefied Hydrogen Carrier SUIISO FRONTIER Launches Building an International Hydrogen Energy Supply Chain Aimed at Carbon-free Society.

URL: [World's First Liquefied Hydrogen Carrier SUIISO FRONTIER Launches Building an International Hydrogen Energy Supply Chain Aimed at Carbon-free Society | Kawasaki Heavy Industries, Ltd.](#) (11.12.2019.)

20. LUMEN LEARNING, 2022. Properties of Hydrogen.

URL: [Properties of Hydrogen | Introduction to Chemistry \(lumenlearning.com\)](#) (25.01.2022.)

21. New Atlas, 2019. Kawasaki launches the world's first liquid hydrogen transport ship. URL: [Kawasaki launches the world's first liquid hydrogen transport ship \(newatlas.com\)](#) (15.12.2019.)

22. NiGen, 2021. International. Pipeline decommissioning proces sin oil and gas.

URL: [https://nigen.com/pipeline-decommissioning-process-in-oil-and-gas/](#) (29.01.2021.)

23. PETROFAC, 2022. The difference between green hydrogen and blue hydrogen.

URL: [https://www.petrofac.com/media/stories-and-opinion/the-difference-between-green-hydrogen-and-blue-hydrogen/](#) (01.02.2022.)

## IZJAVA

*Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad pod naslovom „Napuštanje cjevovoda i prenamjena za transport vodika“ izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko – geološko – naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.*



---

Leonardo Mazić



KLASA: 602-01/22-01/25  
URBROJ: 251-70-12-22-2  
U Zagrebu, 16.02.2022.

**Leonardo Mazić, student**

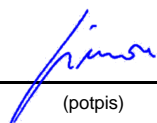
## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/22-01/25, URBROJ: 251-70-12-22-1 od 07.02.2022. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

### NAPUŠTANJE CJEVOVODA I PRENAMJENA ZA TRANSPORT VODIKA

Za mentoricu ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Prof.dr.sc. Katarina Simon nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i komentoricu Dr.sc. Katarina Žbulj.

Mentorica:

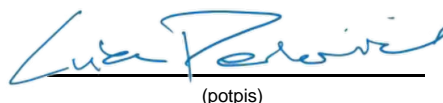


(potpis)

Prof.dr.sc. Katarina Simon

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:



(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)



(potpis)

Dr.sc. Katarina Žbulj

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:



(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje  
Pašić

(titula, ime i prezime)