Izrada podzemnih skladišta prirodnog plina u solnim domama

Bakalović, Monika

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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:169:860952

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij naftnog rudarstva

IZRADA PODZEMNIH SKLADIŠTA PRIRODNOG PLINA U SOLNIM DOMAMA

Diplomski rad

Monika Bakalović
N334

Zagreb, 2020.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

IZRADA PODZEMNIH SKLADIŠTA PRIRODNOG PLINA U SOLNIM DOMAMA

MONIKA BAKALOVIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku
Pierottijeva 6, 10002 Zagreb

Sažetak

Prirodni plin je najčišće fosilno gorivo s najbržim rastom potražnje u posljednjem desetljeću. Prirodni plin se skladišti u podzemnim skladištima prirodnog plina u svrhu zadovoljavanja sezonskih i vršnih potreba. Solne kaverne su najčešći tip skladišta za pokrivanje vršnog opterećenja zbog visoke isporučivosti i kratkog ciklusa između utiskivanja i povlačenja prirodnog plina. Prvo skladište prirodnog plina u solnoj kaverni izrađeno je 1959. godine u Kanadi. Podzemna skladišta prirodnog plina mogu se izraditi u iscrpljenim plinskim/naftnim ležištima, solnim domama/ležištima soli i vodonosnim slojevima. Solne dome su homogene, zbog čega ih karakterizira stabilnost i laka izrada kaverna izluživanjem. Izrada podzemnog skladišta prirodnog plina u solnim kavernama, između ostalog, obuhvaća postupak izrade i opremanja bušotina, izradu kaverne metodom rudarenja otapanjem, monitoring izrade, utiskivanje prirodnog plina u novonastalo podzemno skladište i praćenje radnih karakteristika skladišta.

Ključne riječi: podzemno skladište, prirodni plin, solna doma, solne kaverne, rudarenje otapanjem.

Diplomski rad sadrži: 53 stranice, 15 slika, 2 tablice i 25 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

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

Mentor: Dr. sc. Daria Karasalihović Sedlar, redovita profesorica RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Daria Karasalihović Sedlar, redoviti profesor RGNF
Dr. sc. Katarina Simon, redoviti profesor RGNF
Dr. sc., Domagoj Vulin, izv. prof. RGNF

Datum obrane: 27. studenog 2020.

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Master's Thesis

CONSTRUCTION OF UNDERGROUND GAS STORAGES IN SALT DOMES

Thesis completed in: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Petroleum and Gas Engineering and Energy,
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Abstract

Natural gas has been the cleanest-burning and fastest-growing fossil fuel in the last decade. Natural gas is stored in underground gas storage facilities in order to meet seasonal and peak demands. Salt caverns are the most common type of storage for covering peak loads because of the fast circulation of natural gas. The first gas storage in a salt cavern was constructed in 1959 in Canada. Underground storages of natural gas can be constructed in depleted gas/oil deposits, salt domes/salt rocks, and aquifers. Salt domes are homogeneous, which is why they are characterized by high stability and easy construction, i.e. leaching. The construction of an underground gas storage in salt caverns, among other things, includes the process of well drilling and well completion, the process of solution mining, monitoring the construction and operation of the cavern and the injection of natural gas into the newly created underground storage and monitoring the performance of natural gas storage.

Keywords: underground storage, natural gas, salt domes, salt caverns, solution mining

Thesis contains: 53 pages, 15 figures, 2 tables and 25 references.

Original in: Croatian

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

Supervisor: Full Professor Daria Karasalihović Sedlar, PhD

Reviewers: Full Professor Daria Karasalihović Sedlar, PhD
Full Professor Katarina Simon, PhD
Associate Professor Domagoj Vulin, PhD

Date of defense: November 27, 2020.

SADRŽAJ

1. UVOD 1

2. PODZEMNA SKLADIŠTA PRIRODNOG PLINA U SOLNIM KAVERNAMA .3

2.1. Karakteristike podzemnih skladišta prirodnog plina u solnim kavernama 3

2.2. Numerička simulacija geomehaničkog ponašanja kaverne i određivanje svojstva stijene..... 5

2.3. Izrada solne kaverne 9

2.3.1. Opći zahtjevi za oblikovanjem kaverna 9

2.3.2. Izrada bušotina i solnih kaverna 11

2.3.3. Konstrukcija bušotine 15

2.3.4. Koncepti konstrukcije solne kaverne 17

2.4. Nadzor izrade i rada kaverne..... 18

2.5. Napuštanje podzemnog skladišta prirodnog plina u solnim domama 20

3. ANALIZA SIGURNOSTI SOLNE KAVERNE 23

3.1. Ravnoteža fluida u podzemnom skladištu prirodnog plina – erupcija ugljikovodika..... 24

3.2. Nepropusnost skladišta – istjecanje ugljikovodika 27

3.3. Stabilnost kaverne 29

3.4. Utjecaji temperature i tlaka 30

3.5. Mehaničko ponašanje soli i solne kaverne..... 31

3.6. Napuštanje kaverne 32

4. STUDIJA SLUČAJA - SKLADIŠTENJE PLINA U SOLNIM KAVERNAMA "AARDGASBUFFER ZUIDWENDING" U NIZOZEMSKOJ 36

5. TROŠKOVI IZRADE PODZEMNOG SKLADIŠTA PLINA U SOLNIM DOMAMA.....41

6. SOL – PROIZVODNJA I PRERADA.....42

6.1. Rafiniranje slane vode vakuumskom posudom.....42

6.2. Odlaganje vodene otopine soli 44

7. POTENCIJAL SOLNIH KAVERNI ZA SKLADIŠTENJE VODIKA U EUROPI.....47

8. ZAKLJUČAK 50

9. LITERATURA.....51

POPIS SLIKA

Slika 1-1. Solne kaverne u a) ležištu i b) solnoj domi 2

Slika 2-2-1. 3D model rasjeda i solne kaverne pored rasjeda 6

Slika 2-2-2. Primjer 3D modela nastalog metodom konačne razlike 7

Slika 2-3. Postupak izrade solne kaverne metodom rudarenja otapanjem

Slika 2-4. Prikaz izrade solne kaverne metodom rudarenja otapanjem a) direktnom cirkulacijom i b) obrnutom cirkulacijom 12

Slika 2-5. Dizajn ušća bušotine a) pojedinačne bušotine i b) grm bušotina 16

Slika 2-6. a) Nadzor kaverne tijekom i nakon procesa izrade i b) konačna konfiguracija kaverne 18

Slika 2-7. Procesi inflitracije kroz vremensko razdoblje od 165, 440 i 530 godina 21

Slika 3-1. Scenarij erupcije 24

Slika 3-2. Eksplozija uzrokovana prepunjenjem u Brenhamu 26

Slika 3-3. Prikaz efekta puzanja u Mississippiju (Eminence), Njemačkoj (Kiel) i Francuskoj (Tersanne). Istočkana površina predstavlja netopiv sediment na dnu kaverne. 31

Slika 4-1. Lokacija projekta 37

Slika 4-2. Dimenzije kaverna 38

Slika 4-3. Gantogram projekta.....40

Slika 6-1. Postrojenje za preradu soli vakuumom 43

Slika 7-1. Ukupni potencijal europskih zemalja za skladištenje vodika u solnim kavernama. 49

POPIS TABLICA

Tablica 2-1. Volumen plinskog jastuka i period utiskivanja/povlačenja prirodnog plina u podzemnim skladištima.....4

Tablica 4-1. Karakteristike skladišta.....37

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

l – duljina (m)

E – energija (kWh)

h – dubina (m)

K – propusnost (m^2)

ρ – gustoća (kg/m^3)

Q – volumni protok (m^3/s)

A – površina (m^2)

V – volumen (m^3)

v – brzina (m/s)

P – tlak (Pa) (1 psi ~ 6 894.75 Pa)

θ - otklon kanala bušotine (°)

T – temperatura (K) (0 °C = 273,15 K)

POPIS KORIŠTENIH KRATICA

BiH – Bosna i Hercegovina

EUR – euro

FEM – metoda konačnih elemenata (engl. *Finite Element Method*)

FDM – metoda konačne razlike (engl. *Finite Difference Method*)

HRK – hrvatska kuna

IEA – međunarodna energetska agencija (engl. *International Energy Agency*)

MIT – test mehaničkog integriteta (engl. *Mechanical Integrity Test*)

PSPP – podzemno skladište prirodnog plina

SAD – Sjedinjene Američke Države

UNP – ukapljeni naftni plin

USD – američki dolar (engl. *United States Dollar*)

z.c. – zaštitne cijevi

3D prikaz – trodimenzionalni prikaz

1. UVOD

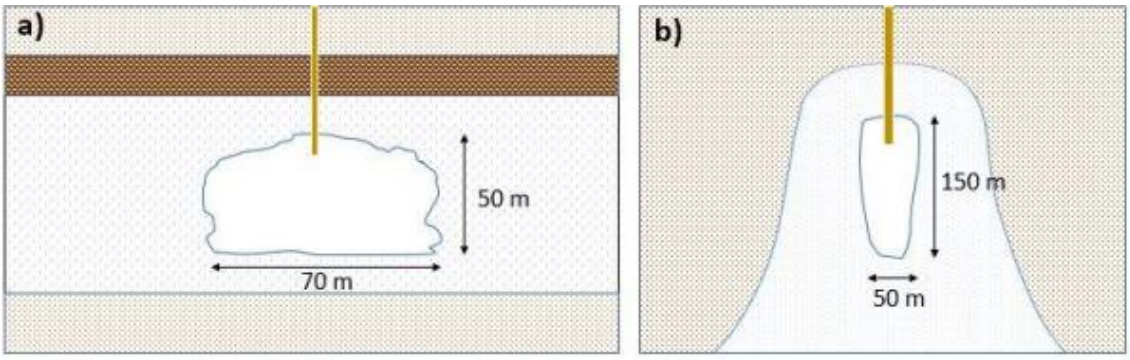
Prirodni plin je fosilno gorivo koje ima brojne ekološke prednosti u usporedbi s drugim fosilnim gorivima, posebice u pogledu emisije stakleničkih plinova prilikom sagorijevanja. Danas čini 23% globalne potražnje za primarnom energijom i gotovo četvrtinu energenta u proizvodnji električne energije (IEA, 2020). Njegova mogućnost skladištenja i operativna fleksibilnost elektrana na plin omogućuju prirodnom plinu da odgovori na sezonske i kratkoročne oscilacije potražnje te da poboljša sigurnost opskrbe električnom energijom u elektroenergetskim sustavima s rastućim udjelom promjenjivih obnovljivih izvora.

Prirodni plin se skladišti zbog osiguravanja sigurnosti opskrbe plinom uslijed sezonskog karaktera potražnje za prirodnim plinom kao i osiguravanja zahtjeva za vršnim opterećenjem potražnje. Prirodni plin obično se skladišti podzemno. Podzemna skladišta prirodnog plina postala su važna i često korištena nedugo nakon Drugog svjetskog rata s razvitkom industrije (Natural Gas, 2020). Za podzemno skladištenje prirodnog plina koriste se iscrpljena nafta/plinska ležišta, vodonosnici i solne kaverne.

Sezonska skladišta prirodnog plina pružaju mogućnost uskladištenja velikih količina prirodnog plina koja se u sjevernom geografskom pojasu u kojem se nalazi Hrvatska obično utiskuju u skladišta u periodu od travnja do listopada, a iz skladišta se povlače od studenog do ožujka. Ovaj tip skladišta karakterizira pravilna izmjena ciklusa utiskivanja i povlačenja prirodnog plina unutar jedne godine. Najčešći tip sezonskog skladišta su iscrpljena plinska ležišta (Natural Gas, 2020). Vršna skladišta prirodnog plina imaju manji skladišni volumen te veliki kapacitete utiskivanja/povlačenja prirodnog plina u usporedbi sa sezonskim skladištem. Služe za pokrivanje vršne potrošnje te se prazne i pune ili nadopunjavaju nekoliko puta godišnje. Solne kaverne su najčešći tip skladišta za pokrivanje vršnog opterećenja, iako i vodonosnici mogu udovoljiti tim zahtjevima.

Prvo skladište prirodnog plina u solnoj kaverni izrađeno je 1959. godine u Unity Saskatchewanu u Kanadi, na dubini od 1100 m, a drugo, u Marysvilleu u Američkoj Saveznoj državi Michigan, 1961. godine na dubini od 1740-2040 m. Europsko skladištenje plina u solnim kavernama započelo je 1970. godine u Tersanneu u Francuskoj, na dubinama od 1400–1500 m te 1971. godine u blizini Kiela, u Njemačkoj, na dubinama većim od 1300 m (Duhan, 2018).

Postoje tri tipa naslaga soli: ležišta soli, solne dome i tektonske soli (engl. *tectonic salts*). Soli se uvijek primarno talože kao ležišta, ali se mogu pretvoriti u solne dome i tektonske soli zbog ujecaja tlaka i tektonizma (engl. *tectonism*). Solne kaverne za skladištenje mogu se izraditi u bilo kojoj od naslaga soli; međutim naslage imaju sličnosti i razlike koje utječu na stabilnost i otapanje kaverna (Duhan, 2018). Slika 1-1. prikazuje solne kaverne u ležišnoj stijeni i solnoj domi. Ležište soli primarno je ležište kamene soli iz kojeg nastaju solne dome i tektonske soli. U ležišnoj stijeni soli se talože kao bočno neprekinuti slojevi.



Slika 1-1. Solne kaverne u a) ležištu i b) solnoj domi (Duhan, 2018)

Solne dome nastaju kada se naslage bogate solima uzdižu uslijed nestabilnosti uzrokovane manjom gustoćom od naslaga koje ih okružuju. U usporedbi s ležištem, dome su bočno ograničene, ali su homogene i veće specifične gustoće. Kao što i samo ime govori, tektonske soli nastale su uslijed tektonske aktivnosti koja stvara guste slojeve soli složene i heterogene građe. Građa tektonskih soli složena je i heterogena. Budući da su solne dome homogene u usporedbi s ostalim tipovima naslaga i okružene neslanim slojevima, lakše ih je otopiti u usporedbi s ležištem soli i tektonskim solima. Ako se sol taloži na odgovarajućoj dubini, kaverne u solnim domama imaju veću stabilnost u usporedbi s kavernama u tankim ležišnim stijenama soli i tektonskim solima (Duhan, 2018).

U ovom radu je opisan postupak izrade podzemnog skladišta prirodnog plina u solnim domama, a uključuje karakteristike i koncepte konstrukcije solnih kaverna, monitoring izrade kaverne i rada skladišta, analizu sigurnosti i postupke napuštanja. U radu je opisana studija slučaja izrade podzemnog skladišta prirodnog plina u solnim domama u Nizozemskoj; prerada i proizvodnja soli te je prikazan potencijal solnih kaverni za skladištenje vodika u Europi.

2. PODZEMNA SKLADIŠTA PRIRODNOG PLINA U SOLNIM KAVERNAMA

2.1. Karakteristike podzemnih skladišta prirodnog plina u solnim kavernama

Nafta i plinoviti ugljikovodici se u solnim kavernama pohranjuju u uvjetima pod tlakom. Sustav bušotine, cjevovoda i i ostale opreme omogućava povremeno povlačenje i utiskivanje fluida iz kaverne.

Prirodni plin se utiskuje u kavernu čime nastaje vrsta spremnika prirodnog plina pod tlakom. Što je veći radni tlak u kaverni, to se prirodni plin može lakše povući iz podzemnog skladišta. Jednom kada tlak plina padne ispod tlaka na ušću bušotine, ne ostaje razlika u tlaku zbog koje se prirodni plin može povući. To znači da u bilo kojem podzemnom skladištu postoji određena količina plina koja se nikada neće povući. To je poznato kao fizički nepovratni plin koji je trajno utisnut u formaciju. Ukupni volumen podzemnog skladišta prirodnog plina sastoji se od plinskog jastuka i radnog volumena skladišta. Plinski jastuk je volumen plina koji osigurava potreban tlak za povlačenje radnog volumena plina. U normalnom radu skladišta, plinski jastuk je uvijek prisutan u kaverni; međutim njegov se dio može povući pomoću specijalne opreme za kompresiju na ušću bušotine. Radni volumen je količina prirodnog plina koja se utiskuje i povlači, a kapacitet skladišta obično se odnosi upravo na radni volumen skladišta. Na početku povlačenja, tlak u kaverni je najviši; što znači da se prirodni plin može povući velikom brzinom. Kako se volumen plina unutar kaverne smanjuje, tlak (a time i isporučivost) u kaverni se također smanjuje (Natural Gas, 2020).

Drugi princip rada podzemnih postrojenja za skladištenje plina je „kompenzacija vodene otopine soli“. Dok se vodena otopina soli utiskuje kroz uzlazne cijevi do dna kaverne, kroz prstenasti prostor između uzlaznih cijevi i zaštitnih cijevi crpi se ekvivalentni volumen uskladištenog plina (Warren, 2016a). Slana voda koja se utiskuje u kavernu radi spomenute kompenzacije mora biti manje zasićena u odnosu na sol u domi. To sprječava bilo kakvu kristalizaciju soli na zaštitnim cijevima, ali također omogućuje izluživanje kaverne *(„injektiranje slatke vode za otapanje soli i stvaranje kaverne i uklanjanje odrađene, solju zasićene, vode obavlja se istom bušotinom“* (Perić, 2007). Redovita cirkulacija vodene otopine soli povećava veličinu kaverne. Posljedica rada PSPP na principu „kompenzacija vodene otopine soli“ je povećanje volumena kaverne. Podzemna skladišta nafte u solnim kavernama u Sjevernoj Americi obično se povećavaju za oko 1-2% godišnje. Neke starije

kaverne u SAD-u i Kanadi sada su dvostruko veće u odnosu na početni izrađeni volumen skladišnog prostora (Warren, 2016a).

Namjenske solne kaverne idealne su za skladištenje prirodnog plina, posebno kad se izrađuju u solnim domama, zbog svoje stabilnosti i sigurnosti s obzirom na to da se nalaze duboko ispod površine zemlje. Podzemno skladište prirodnog plina (PSPP) u solnim kavernama karakterizira volumen plinskog jastuka od oko 33% , za razliku od ostalih tipova podzemnih skladištaukupnog volumena skladištenja (tablica 2-1.).

Tablica 2-1. Volumen plinskog jastuka i period utiskivanja/povlačenja prirodnog plina u podzemnim skladištima (Warren, 2016a)

Tip podzemnog skladišta	omjer volumena plinskog jastuka i radnog volumena	period utiskivanja (dani)	period povlačenja (dani)
Akvifer	50-80%	200-250	100-150
Iscrpljeno ležište nafte/plina	50%	200-250	100-150
Solna kaverna	20-30%	20-40	10-20

Za razliku od ostalih nadzemnih i podzemnih skladišta prirodnog plina, skladištenje u solnim kavernama nudi vrlo visok dnevni i satni kapacitet utiskivanja plina u skladište kao i povlačenja iz skldišta, kao i kratko vrijeme izmjene ciklusa utiskivanja i povlačenja. Kaverne su odlične za korištenje u razdobljima najveće potražnje kao i u naglim promjenama potražnje. Operatori mogu mijenjati režim rada iz perioda utiskivanja u period povlačenja u svega 15 minuta te ponovno u period utiskivanja u 30 minuta. Glavni nedostatak skladištenja prirodnog plina u kaverni su relativno visoki troškovi izrade u usporedbi s drugim oblicima podzemnih skladišta (Warren, 2016a). Namjenski sagrađene kaverne su sigurnije od svih ostalih vrsta podzemnih i nadzemnih skladišta te najprihvatljivije obzirom na utjecaj na okoliš.

Za prikaz troškova, kao primjer se navodi podzemno skladište prirodnog plina u solnim kavernama "Big Hill" u Teksasu; koje je dovršeno 1992. godine, volumena 14,3 milijuna kubičnih metara, u vlasništvu U.S. Petroleum Reserve. Trošak izluživanja (u 1992. godini) iznosio je 1,80 USD po kubičnom metru iskopane soli, a ukupni trošak projekta (uključujući građevinske radove, polaganje cjevovoda, izradu bušotina, utiskivanje prirodnog plina itd.) iznosio je 21,80 USD po m^3. Veći dio troškova odražava potrebu za kontroliranom

cirkulacijom i sigurnim odlaganjem velikih količina vodene otopine soli tijekom faze izrade podzemnog skladišta. Ali, troškovi izgradnje i održavanja su niski u usporedbi s nadzemnim skladištima, koja karakteriziraju mnogo niže brzine ciklusa između utiskivanja i povlačenja prirodnog plina i manji volumen skladišta, veća vjerojatnost značajnih oštećenja tijekom akcidenta (Warren, 2016a). U nadzemnim spremnicima se prirodni plin skladišti u kapljevitom stanju, a skladišti se u spremnicima pod tlakom (koji se danas rijetko koriste) i niskotemperaturnim spremnicima (vertikalni cilindrični spremnici, membranski spremnici, sferični spremnici i PC/PC spremnici).

Stoga, jednom kada je u funkciji skladišta prirodnog plina, kaverna ima nekoliko prednosti u odnosu na iscrpljeno ležište nafte/plina ili vodonosnih slojeva. Namjenske kaverne konstruirane su kao cjelovite strukture koje omogućuju istjecanje vrlo malo utisnutog prirodnog plina iz skladišta. Ako su dobro konstruirane s odgovarajućim slojem soli između pojedinih šupljina, zidovi solne kaverne su snažni i nepropusni tijekom radnog vijeka skladišta.

Očekivani radni vijek podzemnog skladišta u kavernama može biti više od stoljeća u kavernama konstruiranim postojećim tehnologijama. Duboke kaverne u debljim homogenim stijenskim masama soli (što tipizira mnoge solne dome) najsigurnija su, trenutno poznata, skladišta plinovitih ugljikovodika (Warren, 2016a).

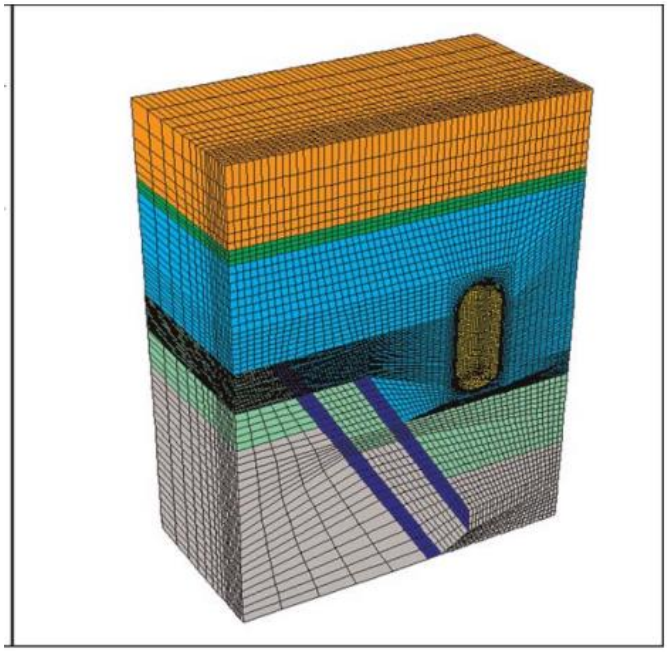
2.2. Numerička simulacija geomehaničkog ponašanja kaverne i određivanje svojstva stijene

Simulacijski model

Struktura stijenske mase, geometrija kaverne, ponašanje materijala i obrasci rada zahtijevaju složene fizičke modele za opisivanje geomehaničkog ponašanja i nosivosti stijenske mase. Određivanje tlakova, naprezanja i deformacija u stijenskoj masi zbog konstrukcije i rada kaverne moguće je samo pomoću numeričkih alata metodom konačnih elemenata (engl. *Finite Element Method* - FEM) ili metodom konačne razlike (engl. *Finite Difference Method* - FDM) (Lux, 2009). Osnovni koncept FEM-a je dijeljenje računske domene na pojedinačne male dijelove i pronalaženje lokalnih rješenja koja zadovoljavaju diferencijalnu jednadžbu unutar granice pojedinog dijela. Spajanje pojedinačnih rješenja zajedno rezultira konačnim rješenjem (Rapp, 2017). Metoda konačne razlike traži rješenja

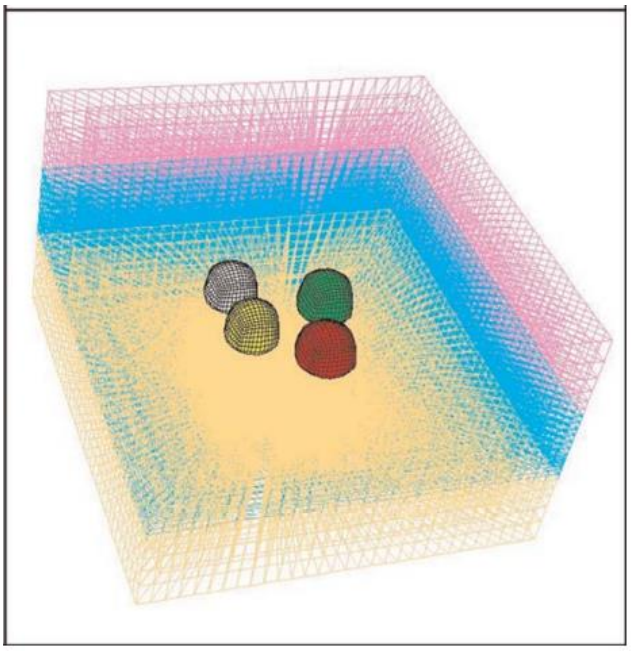
funkcije aproksimiranjem te funkcije oko jedne točke deriviranjem drugih funkcija koje se nalaze u blizini te točke (Sadd, 2005).

Na slici 2-1. prikazan je primjer diskretizacije (postupak aproksimacije područja u bloku konačnim nizom točaka (STRUNA, 2020.)) modela kamene mase (metoda konačne razlike, 96 192 zone i 105 394 rešetke). U ovom primjeru 3D model prikazuje rasjed i solnu kavernu pored rasjeda. Cilj ove numeričke simulacije je analizirati interferenciju između rada kaverne i rasjeda. Dobiveni podaci nisu određene vrijednosti, već mogu biti procijenjeni unutar određenih granica propusnosti. Stoga je tijekom stvarnog postupka projektiranja potrebno napraviti nekoliko izračuna s promjenom ulaznih parametara kako bi se dobio što vjerniji prikaz mehaničkog ponašanja nosivih elemenata kaverne (Lux, 2009).



Slika 2-2-1. 3D model rasjeda i solne kaverne pored rasjeda (Lux, 2009)

Nadalje, slika 2-2. prikazuje još jedan primjer 3D modela u kojem se koristi konačne razlike. U ovom je slučaju prikazan 3D presjek stijenske mase koja okružuje podzemno skladište koje se sastoji se od četiri kaverne različitih konfiguracija na različitim udaljenostima. U ovom primjeru simulacija je usmjerena na prikaz mehaničke interakcije kaverni kao i stabilnost same konstrukcije.



Slika 2-2-2. Primjer 3D modela nastalog metodom konačne razlike (Lux, 2009)

Granični slučajevi opterećenja

Kaverne za skladištenje ili točnije stijenska masa koja okružuje pojedine kaverne načelno su izložene sljedećim opterećenjima (Lux, 2009):

(1) primarnim naprezanjima stijene (ovise o regionalnom geološkom polju naprezanja, engl. *regional geological stress field*, strukturi stijenske mase i dubini);
(2) tlaku unutar kaverne (ovisi o procesu izrade kaverne, obrascu rada i vrsti napuštanja);
(3) temperaturnim promjenama (ovise o temperaturi vodene otopine soli tijekom izrade kaverne, kao i o brzini utiskivanja i povlačenja plina (temperatura skladištenja prirodnog plina je niža od temperature ležišnih i okolnih stijena te ih zbog toga neprestano hladi) i povezanim termodinamičkim procesima tijekom rada skladišta).

U vrijeme projektiranja kaverne točni uvjeti punjenja za fazu rada podzemnog skladišta prirodnog plina nisu poznati jer su oni povezani s potražnjom prirodnog plina, kao i opskrbom. Stoga se moraju utvrditi i analizirati granični slučajevi opterećenja s obzirom na njihovu geotehničku prihvatljivost.

Kaverne za skladištenje prirodnog plina trebaju biti funkcionalne nekoliko desetljeća. Nije dopušteno pogoršanje mehaničkih ili hidrauličkih kvaliteta nosivih elemenata tijekom vremena rada, a ne smiju se isključiti ni oštećenja stijenske mase tijekom godišnjeg ciklusa

skladištenja. Ako postoje navedena oštećenja ona se unutar istog skladišnog ciklusa moraju ukloniti postupcima zarastanja kako bi se obnovila kvaliteta stijenske mase. Oštećenja obično karakteriziraju mikropukotine koje mogu samo-zacijeliti (engl. *self-heal*) rekristalizacijom pod odgovarajućom temperaturom i tlakom (Chen i sur., 2013).

Na početku novog godišnjeg ciklusa skladištenja dostupni su podaci o mehaničkim svojstvima stijenske mase tako da se mora simulirati i numerički analizirati samo referentna operativna godina. Imajući u vidu ovaj preduvjet, simuliraju se uobičajeni slučajevi opterećenja s reprezentativnim radnim ciklusima s ekstremnom razlikom tlaka unutar kaverne te sljedeći granični slučajevi opterećenja (Lux, 2009):

(1) Dopušten maksimalni tlak i povezano vrijeme procesa zacijeljivanja (engl. *healing process*).
(2) Izvanredni slučaj opterećenja (slučaj katastrofe) s padom tlaka u kaverni na razinu atmosferskog tlaka (dolazak do erupcije) čime se dobiva intenzitet oštećenja stijene i dopušteno vrijeme za ponovnu stabilizaciju mehaničke konstrukcije imajući u vidu preduvjet za ograničeno proširenje fraktura i propadanja stijene (nema štetnih utjecaja na susjedne kaverne i površinu).

U slučaju opterećenja (2) moraju se uzeti u obzir promjene temperature (smanjenje temperature stijenske mase), dok se u slučajevima opterećenja (1) i (2) učinak termo-mehaničkih opterećena može zanemariti, posebno u situacijama relativno dubokih kaverna i niske stope pada tlaka.

Određivanje svojstava stijenskog materijala

Planiranje laboratorijskog postupka ispitivanja svojstava stijene ovisi o svojstvima materijala i ponašanju stijena. Uzimajući u obzir da je opće materijalno ponašanje halitnih stijena (engl. *salt rocks*) poznato, koristi se sljedeći postupak za određivanje svojstava i parametara stijenskog materijala (Lux, 2009):

(1) Pretpostavka da će odgovarajuće stijene slijediti opće iskustvo, tj.
    a. stijene poput halita i karnalita ili silvinita pratit će elastično-plastično/viskozno (duktilno) ponašanje

b. stijene poput anhidrita, krede ili pješčenjaka pratit će elastično-pseudoplastično (krhko) ponašanje
c. stijene poput gline, škriljaca ili lapornjaka (glinene stijene) pratit će ponašanje između ta dva načina, ovisno o stupnju zbijenosti tijekom dijageneze;

(2) Odabir i određivanje odgovarajućih konstitutivnih zakona za formaciju stijenske mase relevantne u konkretnom slučaju s mehaničkog stajališta stijene;

(3) Dizajn laboratorijskog programa ispitivanja s obzirom na relevantne stijene i očekivano ponašanje materijala, raspoloživi osnovni uzorak materijala, dostupnu opremu za ispitivanje i parametre stijena koji su potrebni u vezi s predloženim materijalnim zakonima;

(4) Laboratorijsa ispitivanja, procjena podataka laboratorijskih ispitivanja i određivanje parametara materijala;

(5) Prenošenje parametara laboratorijskih ispitivanja na stijensku masu uzimajući u obzir efekte povezane sa stijenom, npr. spojne sustave i njihove mehaničke ili hidrauličke utjecaje kao i svojstva veze.

Sa današnjom opremom moguće je prepoznati ponašanje elastičnih, plastičnih, viskoznih i klastičnih materijala, kao i odgovarajuća svojstva materijala. Nadalje, mogu se utvrditi oštećenja stijena kao i propusnost stijena. Konačno, moguće je promatrati postupak zarastanja oštećenja i pripremiti potrebne podatke za modeliranje pomoću laboratorijskih ispitivanja. Na temelju podataka o kratkoročnim svojstvima materijala, potrebno je analizirati dugoročno ponašanje materijala koji se ispituje. Kamena sol pokazuje izraženo vremenski ovisno ponašanje naprezanje-deformacije. Nakon provedenih ispitivanja i dobivenih rezultata, možda će se trebati poduzeti dodatna ispitivanja, ukoliko postoji potreba za istim.

2.3. Izrada solne kaverne

2.3.1. Opći zahtjevi za oblikovanjem kaverna

Osim osnovnih pravila obuhvaćenim rudarskim zakonima svake pojedine države, kaverne za skladištenje sirove nafte i prirodnog plina moraju udovoljiti nekim općim zahtjevima, općenito sažetim kao geotehnička sigurnost (Lux, 2009).

Zakonu o rudarstvu Republike Hrvatske nalaže da je potrebno izraditi Elaborat o rezervama mineralne sirovine i ishoditi rješenje o utvrđenoj količini i kakvoći rezervi mineralne sirovine ili izraditi Elaborat o geološkim strukturama pogodnim za skladištenje ugljikovodika i trajno zbrinjavanje plinova i ishoditi rješenje o utvrđenoj građi, obliku, veličini i obujmu geoloških struktura pogodnih za skladištenje ugljikovodika i trajno zbrinjavanje plinova.

Opći zahtjevi za oblikovanjem kaverna pri izradi PSPP su (Lux, 2009):

(a) dovoljna statička stabilnost,
(b) pouzdana nepropusnost kaverne i kanala bušotine,
(c) prihvatljivo zalijeganje površinskih slojeva,
(d) napuštanje kaverne u skladu s ekološkim zahtjevima,
(e) maksimalan kapacitet skladištenja plina (minimalni volumen plinskog jastuka i maksimalni radni volumen),
(f) visoka operativna uspješnost i mala konvergencija kaverne,
(g) učinkovita i dugoročna upotrebljivost.

Ovi opći zahtjevi moraju biti ispunjeni tijekom cijelog radnog vijeka kaverne. U principu, ispunjavanje ovih zahtjeva mora se dokumentirati tijekom postupka projektiranja i izdavanja dozvole, prije izgradnje same kaverne. Geomehanički modeli i numeričke simulacije korištene za predviđanje ponašanja stijenske mase (uzimajući u obzir sva opterećenja koja se očekuju tijekom izgradnje i rada, kao i nakon napuštanja) su instrumenti potrebni za dokumentiranje geotehničke sigurnosti i ekonomske upotrebljivosti. Iz sigurnosnih razloga potrebno je razviti odgovarajuće konstrukcijske koncepte koji uzimaju u obzir strukturu i svojstva stijenske mase, kao i strukturno ponašanje nosivih elemenata, s obzirom na moguće mehanizme kvarova, uključujući *in-situ* iskustva (Lux, 2009).

Uzimajući u obzir faze izrade i rada podzemnog skladišta plina u solnoj kaverni, dokaz o geotehničkoj sigurnosti tih konstrukcija mora imati dokaz statičke stabilnosti i dokaz nepropusnosti. Moraju postojati dva ili tri dokaza statičke stabilnosti, posebno za stijene podložne puzanju (engl. *creep*) (Lux, 2009). Puzanje je „*kontinuirano rastuća, obično spora deformacija (naprezanje) tvrde stijene kao rezultat (posljedica) dugotrajnog djelovanja*

malog konstantnog naprezanja" (Perić, 2007). Potrebni dokazi stabilnosti uključuju (Lux, 2009):

(1) ograničenje intenziteta naprezanja ovisno o predviđenom minimalnom tlaku u kaverni i radnom vremenu kako bi se isključile makrofrakture i propadanje na konturi kaverne;
(2) ograničenje puzanja kako bi se isključila puknuća usred puzanja;
(3) ograničenje godišnje srednje konvergencije kaverne.

Zbog cikličkog opterećenja kaverne tijekom nekoliko desetljeća potrebno je isključiti ili ograničiti na prihvatljiv stupanj progresivne mikro i makrofrakture stijenske mase u neposrednoj blizini kaverne. Budući da su geološki nepropusne formacije potrebne za stvaranje solnih kaverna, dokaz nepropusnosti mora pokazati da se ta primarna nepropusnost zadržava pri skladištenju ugljikovodika. Nadalje, ovisno o situaciji specifičnoj za lokaciju, inducirano površinsko slijeganje zbog operativnosti skladišta ili čak izrade kaverne može biti podložno ograničenjima prihvatljivosti. U ovom se slučaju očekivano slijeganje površine kvantificira, izračunavanjem ili izravnim mjerenjima solne dome, za razdoblje rada ili duže.

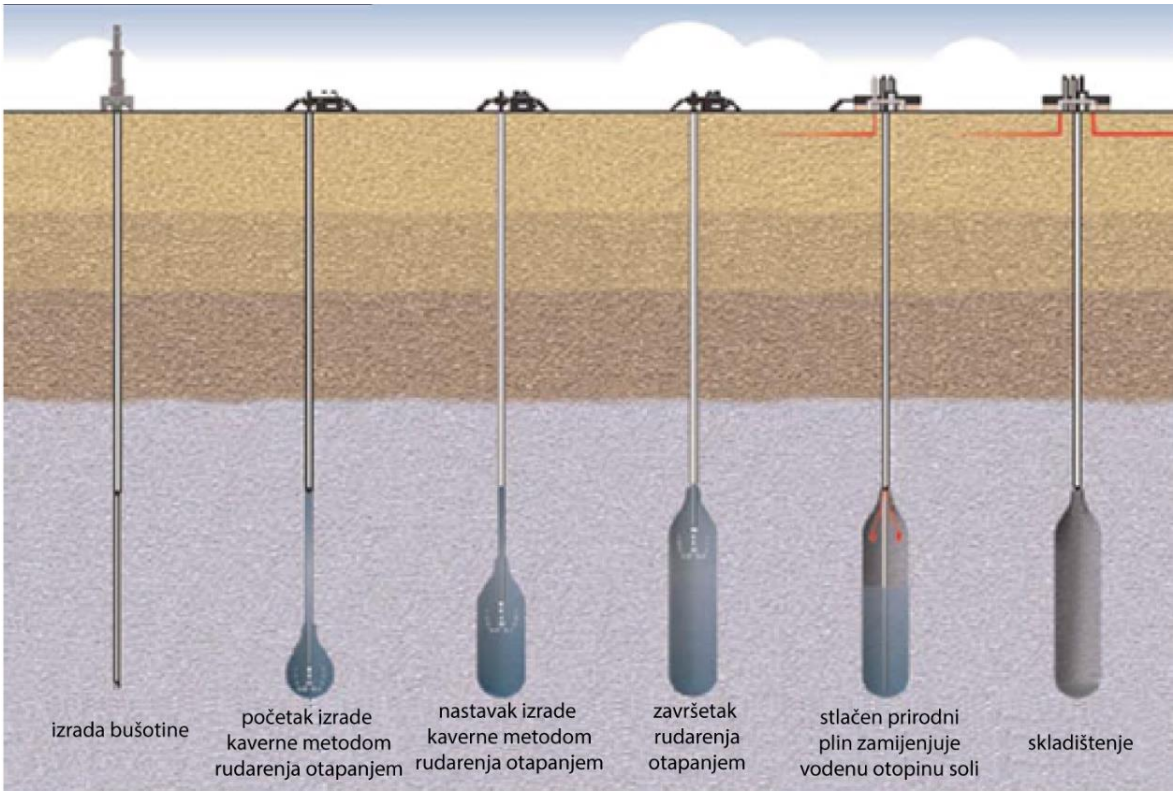
2.3.2. Izrada bušotina i solnih kaverna

Prvi korak u izradi solne kaverne je izrada bušotine odgovarajućeg promjera. Većina bušotina koje se koriste za izradu solnih kaverna imaju veći promjer od bušotina za eksploataciju ugljikovodika ili vode. Projekt izrade bušotine bušotine sastoji se od dvije ili više kolona zaštitnih cijevi.

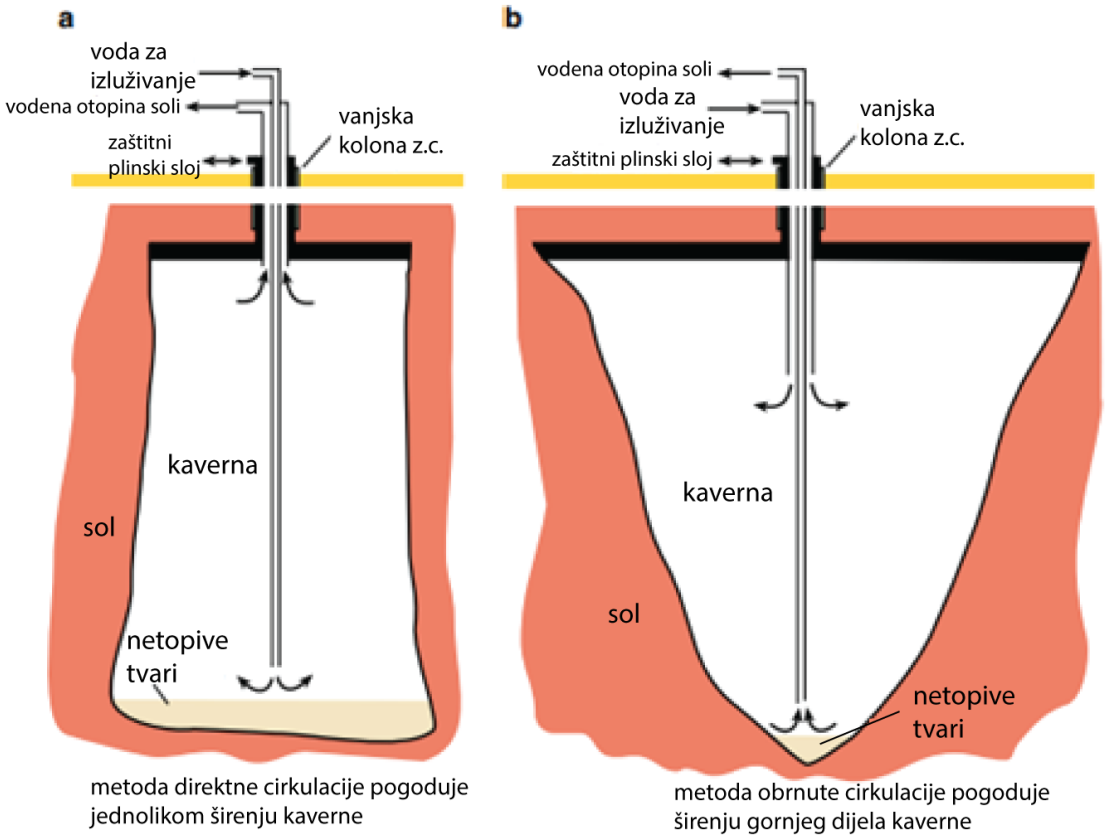
Nakon završetka izrade kanala bušotine do željene dubine, slijedi izrada i oblikovanje kaverne metodom rudarenja otapanjem (engl. *solution mining*); a jedini izravan pristup ležištu su bušotine, stoga se struktura okolnih slojeva općenito, a posebice pokraj pojedinih bušotina, može istraživati samo pomoću geofizičkih metoda (Lux, 2009).

Postupak rudarenja otapanjem, prikazan na slici 2-3., obuhvaća injektiranje vode koja se crpi iz plitkih vodonosnika za otapanje soli i proizvodnju vodene otopine soli kroz bušotine koje dosežu solne dome. U metodi s direktnom cirkulacijom, slatka voda se utiskuje u bušotinu kroz uzlazne cijevi, a vodena otopina soli cirkulira prema ušću bušotine kroz prstenasti prostor između uzlaznih i zaštitnih cijevi kao što je prikazano na slici 2-4. pod a).

Kod metode obrnute cirkulacije slatka voda ulazi u bušotinu kroz prstenasti prostor između uzlaznih i zaštitnih cijevi, a vodena otopina soli cirkulira prema ušću kroz uzlazne cijevi (slika 2-4. pod b)).



Slika 2-3. Postupak izrade solne kaverne metodom rudarenja otapanjem (Lux, 2009)



Slika 2-4. Prikaz izrade solne kaverne metodom rudarenja otapanjem a) direktnom cirkulacijom i b) obrnutom cirkulacijom (Warren, 2016a)

Osim vode, u kavernu se obično utiskuje zaštitni plinski sloj (engl. *fluid blanket*) kako bi se spriječilo brzo proširivanje šupljine prema gore i krajnji kolaps stropa kaverne u rastuću šupljinu. Plin je inertan stoga ne reagira s vodenom otopinom soli, a zbog manje gustoće (od ostalih fluida u kaverni) uvijek ostaje na vrhu. Nekada su se kao zaštitni sloj koristili dizel ili sirova nafta, dok se danas koristi UNP, dušik ili komprimirani zrak, ovisno o zakonskim aktima o očuvanju okoliša u pojedinoj zemlji. Volumen fluida sa zaštitnim plinskim slojem se povećava ili smanjuje kako bi se oblikovala šupljina.

Tijekom izrade kaverne na svakih 7-8 m^3 vode injektirane u solnu domu, otopit će se 1 m^3 soli. Na dnu bušotine se stvara mala kaverna koja se postepeno povećava i širi prema gore. Razlog širenja kaverne prema gore je brže otapanje stropa solne kaverne u odnosu na bokove iste jer injektirana voda ima manju gustoću od vodene otopine soli. Okomito ispiranje još je brže ukoliko je prisutno postojanje plinova. Izradu kaverne metodom otapanja potrebno je nadzirati ili mjerenjem dubine zvučnim valovima (engl. *sonar measurement*) ili laserskim mjerenjima (engl. *laser measurement)* kako bi se pouzdano postigle unaprijed

određene geometrijske dimenzije spremnika (oblik, promjer i konfiguracija stropa). Tijekom, ali i nakon izrade kaverne mora se realizirati i održavati dovoljna i pouzdana nepropusnost budući da umjetno brtvljenje konture kaverne nije moguće. Tehnika izrade kaverne metodom rudarenja otapanjem obično se koristi na dubinama većim od 400–500 m (Warren, 2016a).

U svim slučajevima, nekonsolidirani sediment i druge netopive tvari, kao i nešto soli, talože se u dnu kaverne koja se širi. Zbog toga je tijekom izrade kaverne potrebno zadići dno uzlaznih cijevi (engl. *snubbing*) iznad razine netopivih tvari koje mogu biti uzrok oštećenja opreme. Obično se navedeni problemi javljaju vrlo sporo, a trošak početnog kapitala i rada bušotine je takav da je ukupni trošak vrlo nizak u usporedbi s konvencionalnim rudarskim radovima (Warren, 2016a).

Tijekom posljednjih 150 godina korištene su različite tehnike radi smanjenja troškova proizvodnje vodene otopine soli i povećanja količine proizvedene vodene otopine soli po bušotini. Danas postupak otapanja za jednu bušotinu može uključivati više koncentričnih ili neovisnih nizova uzlaznih cijevi, razne metode postizanja željene dubine bušotine, kao i nekoliko različitih kombinacija zaštitnog plinskog sloja. Međusobno povezivanje više bušotina može se postići dobrim planom izrade bušotina korištenjem odgovarajućeg geološkog razumijevanja, korištenjem zaštitnog plinskog sloja, vodoravnog bušenja i hidrauličkog frakturiranja. Konstrukcija bušotina u najvećoj mjeri ovisi o geološkom razumijevanju solne dome.

Potrebno geološko razumijevanje solne dome uključuje (Warren, 2016a):

(a) varijacije zalijeganja i debljine ciljanog sloja,
(b) mineraloški sastav,
(c) homogenost,
(d) količine netopivih tvari i ponašanje otapanja ciljanog sloja soli i susjednih slojeva soli,
(e) rasprostranjenost i mineralogiju solne dome,
(f) strukturni integritet ležišta.

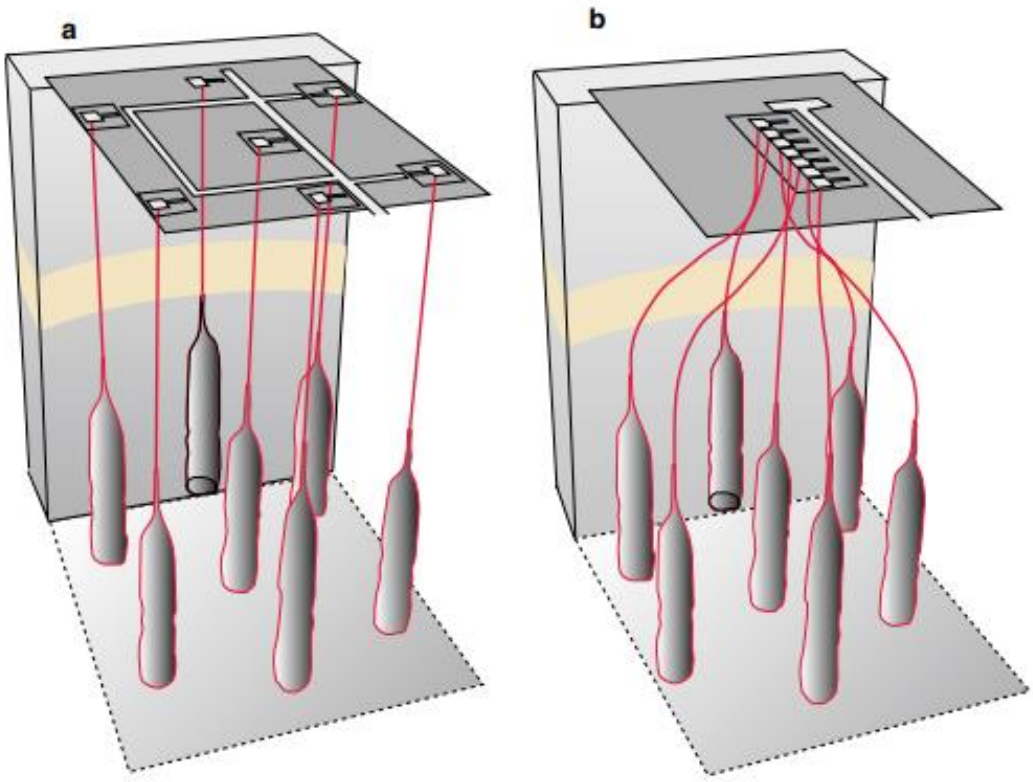
Kaverne napravljene u solnim domama su pouzdanije i predvidljivije od kaverni izrađenih u ležištima soli te su pogodnije za skladištenje ugljikovodika. U usporedbi sa solnom domom, iznad i ispod ležišne stijene se obično nalaze propusne formacije. Najstabilniji oblik kaverne namijenjenog skladištenju nalikuje divovskoj mrkvi ili krastavcu. Ovaj idealan oblik je gotovo nemoguće izvesti u ležišnoj stijeni te je oblik bundeve vjerojatniji ishod.

2.3.3. Konstrukcija bušotine

Odabir oblika sustava bušotina važan je tijekom izrade solne kaverne jer može utjecati na oblik sljedeće kaverne. Postoji nekoliko načina konstruiranja sustava bušotina prilikom izrade podzemnog skladišta plina (Warren, 2016a):

(a) izrada kaverne iz jednog kanala bušotine koristeći sustav zaštitnih cijevi koje se protežu u pojedine kaverne,
(b) izrada nekoliko kanala bušotine koje se protežu u jednu veliku kavernu ,
(c) izrada više kaverna pomoću grma bušotina .

Na slici 2-5. prikazani su mogući načini izrade bušotina.



Slika 2-5. Dizajn ušća bušotine a) pojedinačne bušotine i b) grm bušotina (Warren, 2016a)

Prednosti sustava pojedinačnih bušotina su:

(a) ušće bušotine se najčešće nalazi vertikalno iznad kanala bušotine čime se postiže maksimalna fleksibilnost dubine kaverne i minimiziranje oštećenja kanala bušotine,
(b) jednostavno rukovanje bušaćim alatom,
(c) minimalan kontakt uzlaznih cijevi s kanalom bušotine i dobra kontrola nad bušaćim alatom u slučaju zaglave.

Grm bušotina omogućuju stvaranje više kaverni ispod jednog ušća bušotina i jeftinija su alternativa od izrade nekoliko zasebnih kanala bušotina. Ovakav sustav ima niže troškove infrastrukture i potrebnih dozvola, potreban mu je samo jedan pristupni put, jedan cjevovod za proizvodnju vodene otopine soli, jedan set kabela za napajanje površinske opreme i nadzor jednog mjesta. Međutim, izrada kaverni iz grma bušotina ima manju fleksibilnost u fazi izrade kanala bušotine i održavanju istih (Warren, 2016a). Nakon dovršetka izrade grma bušotina teško je naknadno modificirati proizvodnu zaštitnu kolonu. Da bi se taj nedostatak

kompenzirao, posljednja kolona zaštitnih cijevi mora biti opremljena integralnom spojnicom ispod pete kolone (Warren, 2016a).

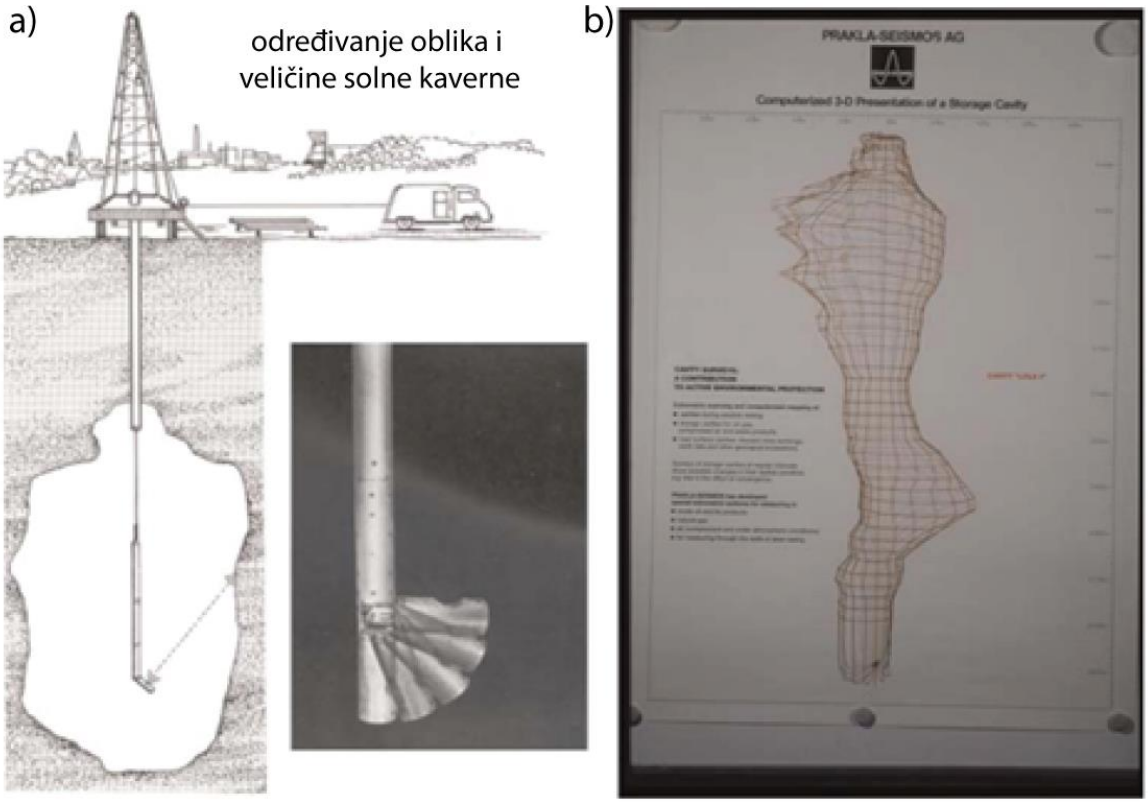
2.3.4. Koncepti konstrukcije solne kaverne

Projektiranje solne kaverne uvelike ovisi o svojstvima ležišta ili solne dome; prema tome, postoje brojni čimbenici koji se moraju uzeti u obzir kako bi kaverna bila održiva i sigurna za skladištenje. Na dubinama većim od 1 200 m i litostatskim tlakom od 270 bara, kaverne u obliku kapsula (farmaceutskih pripravaka) su statički stabilnije od kaverni eliptičnog ili cilindričnog oblika. Kako bi se osigurala geomehanička sigurnost kaverne, mora se definirati i razmotriti debljina okolnih i pokrovnih stijena. Minimalna debljina ovih slojeva za siguran rad izražena je funkcijom promjera kaverne. Na primjer, najmanja debljina okolnih stijena predlaže se kao 75% promjera kaverne, dok je ta vrijednost 20% promjera kaverne za pokrovnu stijenu. Visina kaverne izrađene u solnoj domi nije ograničena zbog veće debljine soli. Primjerice, solna kaverna volumena 750 000 m^3 promjera 58 m može biti visoka je 300 m. Preporučen razmak između kaverni iznosi 4 puta promjera kaverne od okomite osi kaverne (pogled iz ptičje perspektive). To odgovara udaljenosti od 232 m za spomenuti dizajn kaverne promjera 58 m (Cagalayan DG i sur., 2019).

Posljednjih desetljeća širom svijeta razvijeni su dizajni kaverne temeljeni na različitim osnovnim pretpostavkama, posebice u pogledu fizičkih modela i definicije sigurnosti. Modifikacija dizajnerskih koncepata s vremenom odražava napredak u znanstvenom i tehnološkom razvoju. Razvoj je započeo s mehanikom modela prebačenim na analitičke modele temeljene na laboratorijskim istraživanjima (čvrstoća i puzanje); nakon toga su uslijedile numeričke simulacije poboljšane laboratorijskim istraživanjima (oštećenja) i konačno se došlo do sadašnjih modela s geometrijskim i fizičkim nelinearnim 3D numeričkim opisom, uključujući oštećenja i zacjeljivanje kao i naprezanje uslijed temperature i promjene svojstva materijala. Također je moguće izračunati uzrok oštećenja i njegov utjecaj na propusnost stijene. Imajući u vidu sve ove mogućnosti modeliranja, potrebno je odlučiti koji koncept konstrukcije treba odabrati i na kojoj se sigurnosnoj definiciji on treba temeljiti (Lux, 2009).

2.4. Nadzor izrade i rada kaverne

Izrade kaverne obično se kontinuirano nadzire proračunom masene ravnoteže i postupno se nadgleda mjerenjem dubine zvučnim valovima. Glavni cilj ovog nadzora jest osiguravanje potrebnih dimenzija šupljine, tj. promjera kaverne i konfiguracije stropa. Rezultat takvog nadzora prikazan je na slici 2-6.



Slika 2-6. a) Nadzor kaverne tijekom i nakon procesa izrade i b) konačna konfiguracija kaverne (Lux, 2009)

Pod pretpostavkom da je unaprijed definirana konfiguracija zadovoljena tijekom izrade kaverne, potreban je daljnji nadzor tijekom rada podzemnog skladišta plina. Imajući u vidu da je dizajn kaverne samo prognoza, nakon određenog vremenskog razdoblja se mjerenjem dubine zvučnim valovima ili laserskim mjerenjima stvarno stanje (ponašanje kontura, konvergencija). Ovo vremensko razdoblje može varirati između pet i deset godina. Glavni cilj ovih *in-situ* mjerenja je pokazati statičku stabilnost kaverne i pouzdan dizajn. U suprotnom je potrebno dodatno projektiranje, izmjena radnih uvjeta i pojačan nadzor. Više parametara za pouzdani dizajn moguće je odrediti iz rezultata površinskog mjerenja koji su

posljedica konvergencije stijene, a ta konvergencija usko ovisi o karakteristikama puzanja kamene soli specifičnima za lokaciju i obrazac rada (Lux, 2009).

Podaci dobiveni tradicionalnim instrumentima za praćenje ponašanja u kaverni, tj. dokumentiranjem tlaka u bušotini te godišnja ili rjeđa mjerenja površinskog slijeganja i podzemna laserska mjerenja svakih 5 do 10 godina, mogu u nekim slučajevima biti nedovoljni pokazatelji statičke stabilnosti, kao i čvrstoće i dugotrajne zaštite od zalijeganja. Stoga je razvijena posebna strategija nadzora, koja se temelji na stvarnom radu kaverne i mehanici stijena. Tri su glavna razloga za razvoj računalno podržanog programa za dokumentiranje i praćenje rada podzemnog skladišta prirodnog plina (Lux, 2009):

(1) Obrasci rada u kaverni postat su sve složeniji, mijenjajući se od sezonskog skladištenja do fleksibilnijeg skladištenja sa znatno kraćim ciklusima povlačenja prirodnog plina i visokom isporučivošću. Stoga su stvarni podaci o stanju kaverne potrebni u bilo kojem trenutku rada.
(2) Složeni obrasci rada kaverne zahtijevaju pažljivo planiranje postojećih mogućnosti u unaprijed određenim granicama kako bi se osigurala najučinkovitija ekonomska operacija kaverne, na primjer: kombiniranje postojećih količina radnog plina i kapaciteta povlačenja s vremenima rada za određene unutarnje tlakove ili potrebnu brzinu utiskivanja plina za punjenje skladišta plina u zadanom vremenu.
(3) Izrada dokumentacije o radu kaverne u razdoblju rada podzemnog skladišta, uključujući pridržavanje kriterija mehanike stijena za potrebe administartivniih dozvola rada skladišta. Ova dokumentacija dokazuje rad skladišta u odobrenim granicama, kao i njegovu geotehničku sigurnost.

Za planiranje, izgradnju i praćenje rada kaverne koriste se softveri, primjerice *Cavern Operation Survey and Planning*. Ovaj se softver temelji na dnevnim reprezentativnim tlakovima u kaverni proizašlim iz stvarnog rada kaverne. Ovi tlakovi u kaverni/radna vremena pretvaraju se u geomehanički povezane podatke o kaverni, kao što su stope promjene tlaka i stopa puzanja stijene (engl. *creep*), kao i promjene konvergencije kaverne. Sami tlakovi i određeno vrijeme čekanja kao i dobiveni podaci relevantni za mehaniku stijena uspoređuju se sa specifičnim kriterijima/dopuštenim graničnim vrijednostima. Ova usporedba pokazuje prihvatljiva i nedopustiva radna stanja s obzirom na geomehaničke kriterije. Provjeravaju se sljedeći čimbenici (Lux, 2009):

(1) minimalni i maksimalni dopušteni radni tlakovi u skladištu;
(2) maksimalna stopa povlačenja i utiskivanja;
(3) vrijeme rada pri minimalnom tlaku;
(4) dopušteno puzanje s obzirom na unutarnji tlak u kaverni.

Nadalje, količina povlačenja i utiskivanja prirodnog plina izračunava se na dnevnoj bazi i utvrđuje se integrirana količina plina. Promjena volumena skladištenja u kaverni zbog konvergencije stijenske mase može se uzeti u obzir.

2.5. Napuštanje podzemnog skladišta prirodnog plina u solnim domama

Prilikom napuštanja podzemnog skladišta prirodnog plina u solnim domama u obzir treba uzeti dugoročnu zaštitu okoliša uz sigurno i ekonomično rješenje.

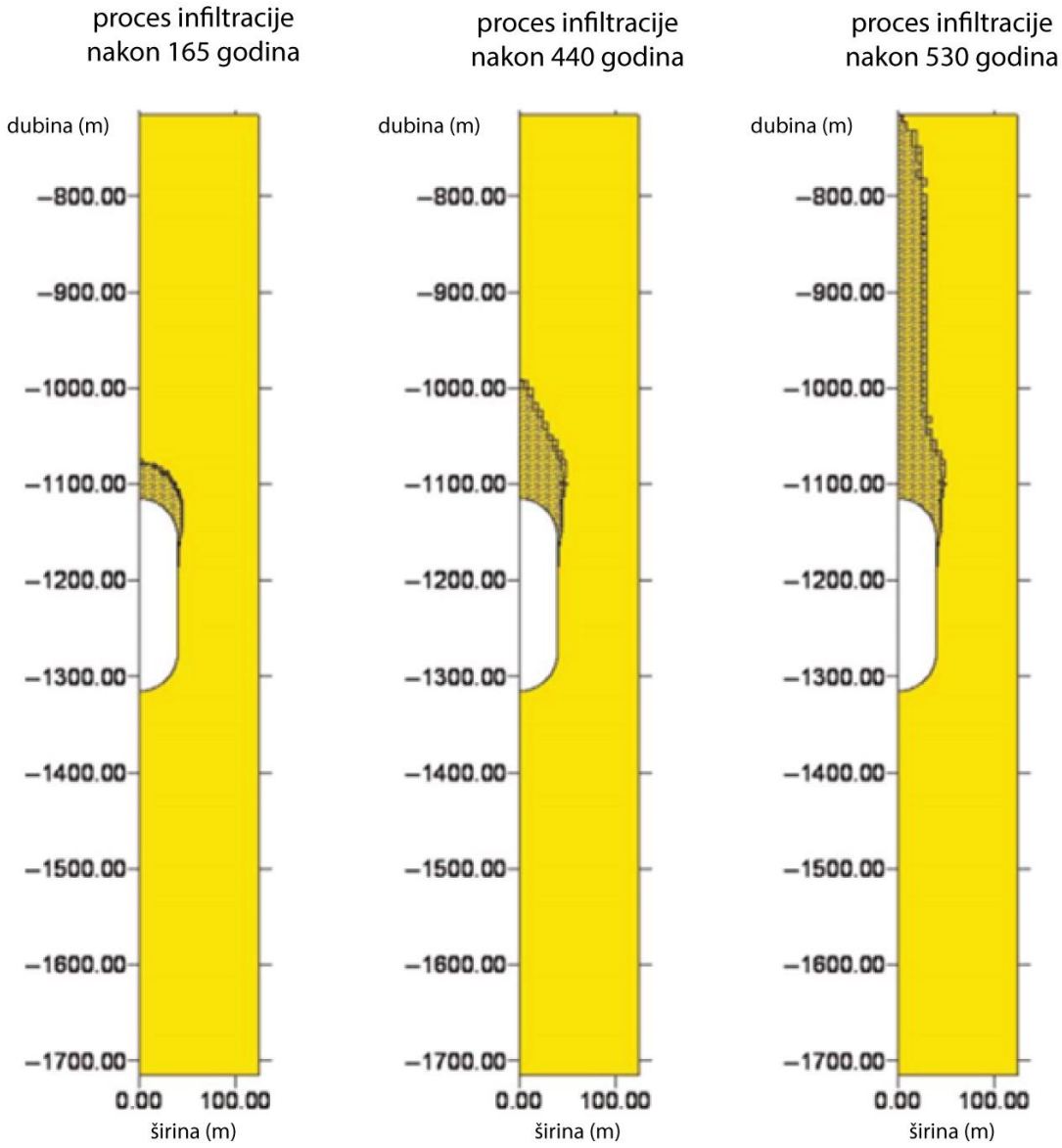
Razmatrano je nekoliko mogućnosti napuštanja solne kaverne (Lux, 2009):

(1) punjenje kaverne zrakom pod atmosferskim tlakom;
(2) punjenje kaverne vodom ili slanom vodom, uz nezatvaranje bušotine;
(3) punjenje kaverne pijeskom ili šljunkom;
(4) punjenje kaverne organskim krutim više ili manje otrovnim otpadom, na primjer iz rudarske ili ne-rudarske industrije, kao i iz spalionica (komunalni otpad);
(5) punjenje kaverne vodom ili slanom vodom uz trajno zatvaranje bušotine.

Opcijama (1) i (2) ne mogu biti zagarantirani ni dugoročna statička stabilnost ni površinska zaštita, a iako je slučaj (3) tehnički izvediv, industrija smatra da nije ekonomski isplativ. U načelu je slučaj (4) također tehnički izvediv kao podzemno skladište za konačno odlaganje toksičnog otpada regulirano zakonom.

Trenutno je posljednja opcija (5) prihvaćeno rješenje, kako iz ekonomskih razloga, tako i zbog prihvaćanja javnosti. Tijekom posljednja četiri desetljeća provedena su mnoga znanstvena istraživanja vezana uz tehničku izvedivost. Glavno se pitanje odnosi na hidromehaničko ponašanje trajno zatvorene solne kaverne ispunjene fluidom, a to uključuje identifikaciju i karakterizaciju osnovnih hidrauličkih i mehaničkih procesa kao i postojeće mogućnosti fizičkog modeliranja i numeričke simulacije povezanih procesa.

Pod pretpostavkom da postoji dugotrajno čvrsto brtvljenje kanala bušotine, deformacija stijenske mase će zbog svojstva puzanja zajedno s različitim gustoćama tekuće i kamene soli uzrokovat izvjesni nadtlak fluida na području strop a kaverne. Laboratorijski testovi i iskustva na terenu pokazuju da uslijed povećanog tlaka na strop kaverne, koji premašuje tangencijalna naprezanja u stijeni, može doći do inflitracije. Fluid pod pritiskom isprva stvara mikrofrakture u matriksu polikristalne kamene soli, zatim infiltrira u te novostvorene frakture te se tlak fluida ponovno povećava zbog konvergencije kaverne. Mikrolomovi se šire, a uz mogućnost njihova povezivanja dolazi do stvaranja sekundarne poroznosti. Procesi inflitracije kroz vremensko razdoblje od 165, 440 i 530 godina prikazani su na slici 2-7.



Slika 2-7. Procesi inflitracije kroz vremensko razdoblje od 165, 440 i 530 godina (Lux, 2009)

U konačnici, rezultati brojnih numeričkih simulacija i laboratorijskih ispitivanja daju izvrsnu osnovu za iznošenje temeljnih zaključaka o napuštanju solne kaverne, a uključuju odgovore na sljedeća pitanja:

- Razvija li se zona infiltracije s progresivnim širenjem na propusne formacije?
- Koliko je vremena potrebno da procesom infiltracije nastane hidraulički proboj?
- Mijenjaju li se mehanička svojstva slane stijenske mase u infiltracijskoj zoni?
- Kakva se hidraulička situacija očekuje nakon dugoročnog proboja?
- Postoje li daljnje hidraulički inducirane mikropukotine nakon proboja?
- Održava li infiltrirana slana masa iznad stropa kaverne svoju mehaničku kvalitetu?
- Je li moguće, ekološki i sigurno, ispustiti vodenu otopinu soli u duboke podzemne vode?
- Postoje li posljedice napuštanja bušotine?
- Koliko vremena treba da se postigne konačna konvergencija kaverne?
- Jesu li stopa zalijeganja i maksimalno zalijeganje prihvatljivi na površini?
- Postoji li rizik od dugoročnog razvoja ponora?

Nakon detaljne analize i promišljanja, odabire se ekološki i ekonomski prihvatljiv način napuštanja solne kaverne.

3. ANALIZA SIGURNOSTI SOLNE KAVERNE

Podzemna skladišta prirodnog plina u solnim kavernama mnogo su sigurnija od ostalih skladišta u pogledu sigurnosti i zaštite okoliša: kao što i sam naziv kaže – podzemna su, tvorbe soli gotovo su savršeno nepropusne; a ugljikovodici su odvojeni od kisika u zraku sa nekoliko stotina metara stijene. Ta ista prirodna barijera štiti ih od požara, namjernih oštećenja i udara zrakoplova. Visoki tlakovi u podzemnom skladištu ne predstavljaju problem ako je visoki tlak prirodno stanje fluida pod zemljom i posljednje, ali ne najmanje bitno, podzemno skladište je izuzetno ekonomično u pogledu površine zemljišta.

Podzemna skladišta plina u solnim kavernama razlikuju se od standardnih površinskih spremnika (Berest i sur., 2003):

1. Podzemno skladište u solnoj kaverni sastoji se od kanala bušotine i same kaverne. Kanal bušotine je opremljen sa zaštitnim i uzlaznim cijevima u kojima se nalaze fluidi različitih gustoća. Ukoliko dođe do izravnog kontakta fluida koji se nalazi u prstenastom prostoru i fluida koji se nalazi u uzlaznim cijevima dolazi do nestabilnosti zbog promjene tlaka stupca fluida koja može rezultirati nesrećom poput erupcije i istjecanja ugljikovodika.
2. Volumen spremnika je vrlo velik (do 1 000 000 m^3). Čak i mali pad tlaka u kaverni rezultira značajnom promjenom volumena uskladištenog proizvoda. Stlačivost fluida je vrlo bitna karakteristika za sigurni rad velikih podzemnih skladišta.

Dva navedena faktora imaju značajnu ulogu u sigurnom radu podzemnog skladišta prirodnog plina u solnoj kaverni.

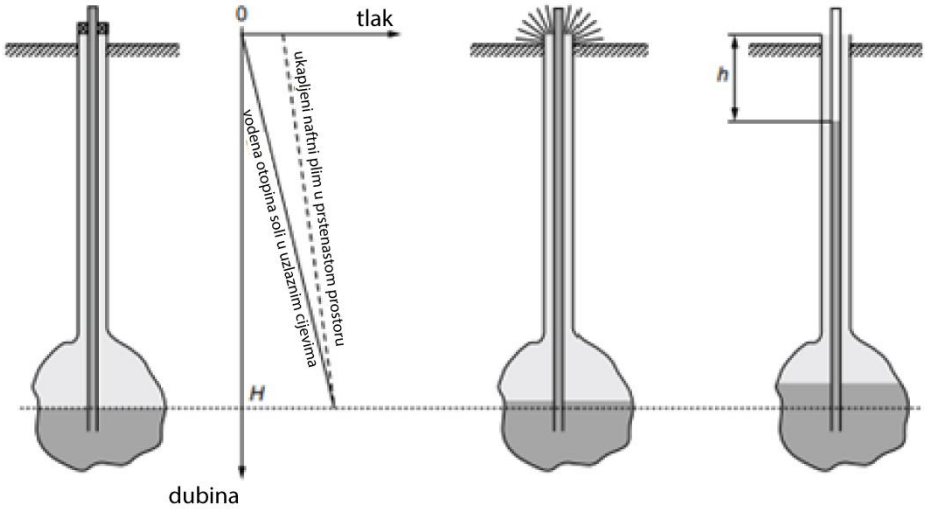
Ugljikovodici su vrijedni jer oslobađaju velike količine energije kada sagorijevaju ili eksplodiraju što ih čini opasnima za prijevoz ili skladištenje. U podzemnim skladištima dogodilo se nekoliko nesreća. Povijesti slučajeva takvih nesreća pružaju najbolje primjere za sprečavanje daljnjih akcidenata. Većina nesreća se dogodila u starim kavernama, stvorenim u vrijeme kada se iz iskustva moglo izvući svega nekoliko pouka i kada nije postojalo puno propisa o načinu izrade podzemnih skladišta prirodnog plina u solnim kavernama. Mnogo se od tada naučilo, što je dovelo do značajnih poboljšanja u izradi i radu istih. Na primjer, u SAD-u, koji ima najveći broj solnih kaverna na svijetu, stalna poboljšanja odražena u razvoju propisa čine skladišta mnogo sigurnijima nego što su bila prije (Berest i sur., 2003).

3.1. Ravnoteža fluida u podzemnom skladištu prirodnog plina – erupcija ugljikovodika

Kao što je ranije navedeno, solna kaverna djeluje kao posuda pod tlakom: fluidi visokog tlaka nalaze se unutar krute nepropusne ovojnice, a sustav ventila omogućava protok fluida u kanalu bušotine.

U slučaju da se u podzemnom skladištu pohranjuje ukapljeni naftni plin, prilikom perioda povlačenja UNP-a iz podzemnog skladišta, vodena otopina soli se utiskuje kroz uzlazne cijevi. Tlak vodene otopine soli je razmjeran dubini i gustoći vodene otopine soli koja iznosi oko 1200 kg/m^3. Ako je kontakt plina i vodene otopine soli 1000 m ispod razine tla, tlak u ovoj točki bit će približno 12 MPa. U toj točki su tlak vodene otopine soli i tlak ukapljenog prirodnog plina jednaki. Iznad ove točke se tlak u prstenastom prostoru ispunjenom UNP-om postepeno smanjuje, iako se to događa sporije nego u koloni uzlaznih cijevi jer je gustoća plina manja (oko 500 kg/m^3 za UNP), na određenoj dubini, tlak u prstenastom prostoru je veći od tlaka u koloni uzlaznih cijevi.

U navedenom primjeru je najveća razlika na ušću kanala bušotine gdje je tlak UNP-a 7 MPa te vrši pritisak na ventil koji upravlja prstenastim prostorom (Berest i sur., 2003). Ako ovaj ventil zataji dolazi do erupcije plina, a razina vodene otopine soli u središnjem nizu se smanjuje sve dok se ne postigne nova ravnoteža; kontakt UNP-vodena otopina soli u uzlaznim cijevima smanji se za dubinu *h* kao što je prikazano na slici 3-1.



Slika 3-1. Scenarij erupcije (Berest i sur., 2003)

Ograničena količina UNP-a prvo eruptira u tekućem obliku, a zatim postupno ispari stvarajući oblak plina veće gustoće od zraka. Zapaljenje oblaka plina je vjerojatno (Berest i sur., 2003).

Prepunjenje u Brenhamu (Teksas)

Pri skladištenju fluida, krivi izračun položaja kontakta vodene otopine soli-ugljikovodika u kaverni može dovesti do prodora ugljikovodika u kolonu uzlaznih cijevi ispunjenih vodenom otopinom soli, s dramatičnim posljedicama ukoliko sustav za zatvaranje kanala bušotine zataji. Takva nesreća dogodila se 1992. godine u Brenhamu u Teksasu.

Skladište u solnoj kaverni Brenham volumena 60 000 m^3 napunjeno je UNP-om (zapravo mješavinom propana, etana, n-butana i drugih plinova). UNP se utiskivalo ili povlačilo iz tri različita cjevovoda. Vodenu otopinu soli su osiguravala dva nadzemna bazena. Ušće bušotine bilo je opremljeno je ventilom za zatvaranje. Postrojenjem Brenham daljinski je upravljao dispečer u Tulsi u Oklahomi.

U 5:43 ujutro u kavernu je utisnut UNP. Kontakt vodene otopine soli UNP-a je neočekivano dosegao rupu istjecanja (engl. *weep hole*) promjera 2,5 cm koja se nalazi u donjem dijelu kolone uzlaznih cijevi, 30 cm iznad dna kolone (engl. *tubing base*). Kada razina vodene otopine soli dosegne rupu istjecanja, UNP ulazi u sustav za proizvodnju vodene otopine soli, uzrokujući porast tlaka i brzine protoka u cijevima. Da bi se spriječilo prekomjerno punjenje kaverne, započinje zaustavljanje kaverne kada se UNP detektira u sustavu površinske otopine . UNP je ušao u kolonu uzlaznih cijevi, što je dovelo do smanjenja tlaka stupca fluida u koloni, djelomičnog isparavanja, širenja etana, pada tlaka u kaverni i, na kraju, do većeg protoka plina kroz rupu istjecanja i bazu tubinga. Vodena otopina soli, praćena ukapljenim plinom, izbila je na površini bazena. Iscurilo je oko 500-1600 m^3 ukapljenog prirodnog plina.

Ispuštanje plina u atmosferu aktiviralo je detektore plina na razini tla (takva aktivacija bila je relativno čest događaj na ovoj postaji, često nevezana uz stvarno ispuštanje plina.) Dispečer u Tulsi nije bio u stanju ispravno protumačiti pomalo zbunjujuće podatke koje je dostavio telemetrijski sustav - poslan je jedinstveni signal, bez obzira na broj aktiviranih detektora. Pretpostavlja se da je ventil za zatvaranje na ušću (ili sigurnosni ventil u kaverni)

odmah reagirao na visoku razinu tlaka (0,7 MPa) u koloni uzlaznih cijevi, ali je došlo do zatajenja sustava.

Nad postrojenjem se razvio plinski oblak veće gustoće od zraka, visine desetak metara. Zaposlenici su blokirali rute kako bi spriječili pristup postrojenju. U 7:08 sati ujutro automobil je ušao u magloviti oblak i zapalio plin, što je rezultiralo teškom eksplozijom, a tri osobe su preminule od zadobivenih ozljeda (Slika 3-2).



Slika 3-2. Eksplozija uzrokovana prepunjenjem u Brenhamu (Berest i sur., 2003)

Analiza nesreće identificirala je nekoliko uzroka (Berest i sur., 2003):

- pogrešna procjena količine uskladištenog UNP-a (stvarni volumen skladištenog UNP-a bio je 52 500 m^3, a ne prethodno procijenjenih 45 800 m^3) zbog netočnog mjerenja, pogrešnih izračuna od strane zaposlenika, pogrešnog saznanja o gustoći UNP-a;
- udaljenost između dna kolone uzlaznih cijevi i rupe istjecanja je bila 1,8 m nakon remonta postrojenja, umjesto 0,3 m kao što je bilo u projektnoj konfiguraciji 1992. godine;
- nedovoljno detaljne informacije poslane kontrolnoj ploči;
- otkazivanje ventila sustava sigurnosnog zatvaranja.

3.2. Nepropusnost skladišta – istjecanje ugljikovodika

Nepropusnost je osnovni preduvjet za mnoge podzemne radove u kojima je potrebno minimalno istjecanje proizvoda, a ovisi o okolišu i ekonomskim kriterijima. Zrak, prirodni plin, butan i propan nisu otrovni iz perspektive zaštite podzemne vode: istjecanje dovoljno razrijeđenog prirodnog plina u podzemne vode ima utjecaj na kvalitetu vode.

Iz perspektive zaštite površine tla, najznačajniji rizik je nakupljanje zapaljivog plina u njenoj blizini. Plinovi teži od zraka (propan, etilen, propilen) opasniji su od prirodnog plina, no nesreća u Hutchinsonu u Kansasu dokazala je da nakupljanje prirodnog plina u plitkim vodama može stvoriti ozbiljne posljedice.

Ekonomska perspektiva skladišta ugljikovodika u osnovi ovisi o brzini utiskivanja/povlačenja i prirodi skladištenih proizvoda. Na primjer, prilikom skladištenja komprimiranog zraka za apsorbiranje dnevnog viška električne energije smatra se razumnim gubitak od 1% dnevno. Pri skladištenju strateških zaliha nafte gubitak mora biti manji od 1% godišnje.

Čimbenici koji pridonose sprečavanju istjecanja u solnim kavernama su:

(a) raspodjela tlaka fluida različitih gustoća;
(b) geološko okruženje;
(c) dobra cementacija i konfiguracija kanala bušotine

Ispitivanje nepropusnosti

Nepropusnost se može provjeriti pomoću testa mehaničkog integriteta (engl. *Mechanical Integrity Tests* - MIT). Koriste se dvije vrste MIT-a (Berest i sur., 2003):

(1) Test istjecanja dušika (engl. *The Nitrogen Leak Test*) sastoji se od ispuštanja dušika u prstenasti prostor ispod zadnje cementirane zaštitne cijevi. Središnji niz je ispunjen vodenom otopinom soli te se karotažnim sondama bilježi dubina kontakta vodene otopine soli dušika u prstenastom prostoru. Obavljaju se dva ili tri mjerenja, uglavnom u razmaku od 24 sata; a pomicanje kontakta vodena otopina soli-dušik smatra se dokazom istjecanja dušika.

(2) Test istjecanja fluida (engl. *The Liquid Leak Test*) sastoji se od tlačenja kaverne ispunjene fluidom. Tijekom ispitivanja, pažnja se posvećuje promjeni tlaka fluida mjerenom na ušću bušotine; prebrzi pad tlaka jasan je znak slabe propusnosti.

Nesreća Mont Belvieu

Nesreća se dogodila 1980. godine u Mont Belvieu u Teksasu. Pad tlaka zabilježen je 17. rujna 1980. godine u jednoj od kaverna za skladištenje prirodnog plina. 3. listopada 1980. godine je plin (70% etana, 30% propan) koji se nakupio u temeljima kuće na tom području eksplodirao kao posljedica iskre iz električnog uređaja. Kaverna u kojoj je došlo do pada tlaka napunjena je vodenom otopinom soli. U danima koji su uslijedili, plin se neočekivano pojavio u okolini, a oko 50 obitelji moralo je biti evakuirano iz svojih domova. Izrađeno je nekoliko bušotina iznad solnih doma kako bi se pronašao i odzračio plin.

U nedostatku potpunih detaljnih podataka, autori članka „Safety of Salt Caverns Used for Underground Storage“ P. Berest i sur. izveli su analizu nesreće na temelju tipičnog podzemnog skladišta propana u solnoj domi.

Solna doma je geološka formacija u kojoj se izvorno vodoravni sloj soli uzdizao prema površini probijanjem gornjih slojeva. Kad doma dostigne vodonepropusne slojeve, vrh se može rastopiti, ostavljajući izolacijsku pokrovnu stijenu okruženu slanom vodom. Ako su zaštitne cijevi oštećene (npr. korozivnim djelovanjem) uskladišteni plin može krenuti prema pokrovnoj stijeni. Propuštanje je brže kada postoji visoka razlika u tlakovima između skladištenog proizvoda i podzemne vode. Ta razlika može biti značajna ako pokrovna stijena zaliježe mnogo više od solne kaverne. Zbog svoje niske gustoće, propan teži uzdizanju na površinu, a ukoliko postoji dovoljno propusni sloj odmah ispod površine tla, plin se može akumulirati u temeljima zgrada, pojaviti se u potocima i sličnim nisko zaliježućim slojevima (Berest i sur., 2003).

Arhitektura kanala bušotine igra najveću ulogu u slučaju propusnosti. Da su posljednje dvije cementirane kolone zaštitnih cijevi bile usidrene u formaciju solne dome, propuštanje bi bilo usmjereno u cementirani prstenasti prostor između te dvije kolone, sa znatno manjim posljedicama.

3.3. Stabilnost kaverne

Konvergencija solnih kaverna

„Konvergencija je postupno smanjivanje vertikalne udaljenosti ili intervala između dviju litoloških jedinica ili geoloških horizonata kao posljedica smanjivanja debljine (stanjivanja) međuslojeva“ (Perić, 2007). Sve solne kaverne konvergiraju kako se postupno i prilično sporo skupljaju. Predviđanje gubitka volumena dovelo je do brojnih članaka, ali je konvergencija kaverne još uvijek karakteristika koja se istražuje (Berest i sur., 2003).

Nguyen M. i sur. dokazali su da je na lokalitetu Tersanne, gdje je konvergencija kaverne relativno velika, da je zalijeganje na površinskoj razini iznosilo 60% od procijenjenog gubitka volumena kaverne nakon 6 godina rada. U toj 1400 m dubokoj formaciji soli, stopa slijeganja bila je otprilike 1 cm godišnje.

Stopa konvergencije u plitkim kavernama ispunjenim fluidom je mala. Brouard je 1998. godine mjerio istjecanje vodene otopine soli kroz ušće bušotine duboke 950 m, kaverne volumena oko 7500 m^3 na mjestu Etrez. Ispitivanje je provedeno 15 godina nakon izrade kaverne: učinci toplinske ekspanzije postaju zanemarivi nakon toliko vremena; a istjecanje vodene otopine soli od 7,2 l/dan može se pripisati konvergenciji kaverne. Relativna brzina gubitka volumena bila je vrlo mala, zanemariva brojka.

Neka skladišta prirodnog plina pretrpjela su velike gubitke volumena. Kaverne u solnim domama Eminence u Mississippiju doživjele su velike promjene nakon relativno kratkog vremenskog razdoblja. Prema Baaru su „*neočekivane anomalije u zatvaranju prve kaverne uključivale širenje dna kaverne za 36 m i gubitak volumena možda do 40%*“. Bérest i sur. sugerirali su da je asimetrična deformacija ove kaverne nastala zbog veće temperature i većeg tlaka preopterećenja na dnu nego na vrhu kaverne.

Röhr je iznio određene podatke koji se odnose na kavernu za skladištenje plina Kiel 101. Ova kaverna je izrađena na dubini od 1305 m do 1400 m. Mjerenje dubine zvučnim valovima 1967. godine pokazalo je da se volumen kaverne smanjio sa 36 600 m^3 na 32 100 m^3. Pet mjeseci kasnije uočen je dodatni gubitak od 1900 m^3 skladišnog volumena kaverne.

Boucly i sur. iznijeli su podatke o Te02, kaverni za skladištenje plina u Tersanneju na jugoistoku Francuske. Ova kaverna u obliku kruške izrađena je 1970. godine. Početni volumen bio je oko 91 000 m^3, a dodatni volumen netopivih sedimentinih stijena 22 000 m^3. Od rujna 1970. godine do srpnja 1979. godine srednji tlak u kaverni ostao je razmjerno visok (18 MPa), ali razlike u tlaku bile su relativno velike. Povijest tlaka plina u kaverni (Pi) u ovom je kontekstu važan i može se sažeti na sljedeći način:

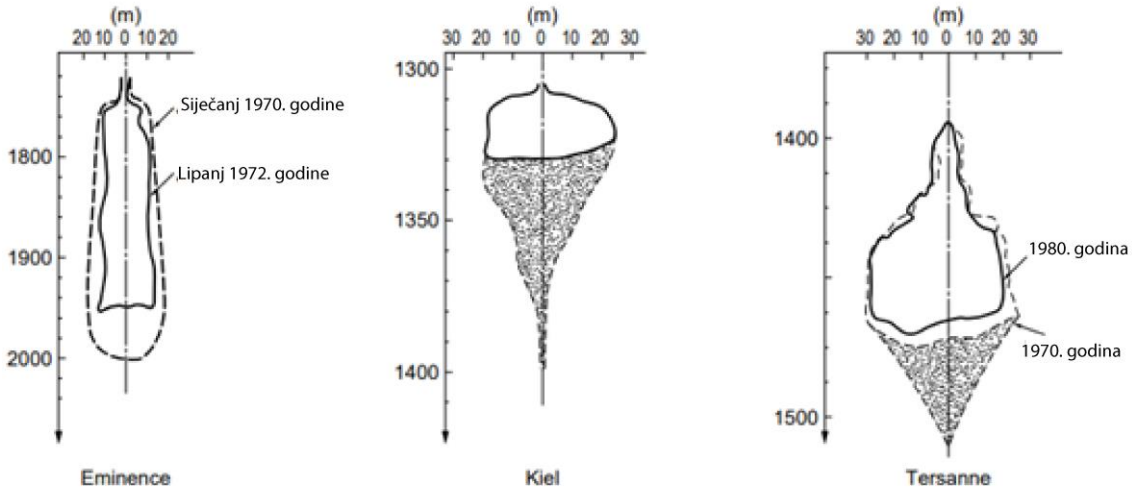
- 8 MPa ≤ Pi ≤ 10 MPa u ukupnom razdoblju od 163 dana;
- 10 MPa ≤ Pi ≤ 15 MPa za 556 dana;
- 15 MPa ≤ Pi ≤ 20 MPa za 1059 dana;
- 20 MPa ≤ Pi ≤ 22 MPa tijekom 1549 dana.

Nakon devet godina rada, volumen za skladištenje plina smanjen je za oko 35%.

3.4. Utjecaji temperature i tlaka

Laboratorijska ispitivanja dokazala su da je puzanje slane stijenske mase osjetljivo na temperaturu. To znači da će puzanje biti veće ukoliko se kaverne nalaze na velikoj dubini, kako zbog viših temperatura, tako i zbog većih razlika u tlaku u dubljim kavernama.

Međutim, problemi mehanike stijena nisu vezani samo uz povećanu temperaturu i tlak. Nekoliko drugih parametara igra važnu ulogu, uključujući oblik stropa kaverne (treba izbjegavati ravan strop s velikim rasponom, jer je sklon raslojavanju), udaljenost od dna do vrha kaverne, razmak između dviju susjednih kaverna i udaljenost od bočnih doma (koja su često sjedište naprezanja). Efekt puzanja u Mississippiju, Njemačkoj i Francuskoj prikazan je na slici 3-3.



Volumetrijski gubitak kaverne Kiel nije prikazan.

Slika 3-3. Prikaz efekta puzanja u Mississippiju (Eminence), Njemačkoj (Kiel) i Francuskoj (Tersanne). Istočkana površina predstavlja netopiv sediment na dnu kaverne. (Berest i sur., 2003)

3.5. Mehaničko ponašanje soli i solne kaverne

Što se tiče ponašanja solne kaverne, situacija je pomalo paradoksalna. S jedne strane, dostupna je znatna količina laboratorijskih podataka. Također, izvedeni su različiti numerički modeli koji su sposobni prihvatiti sofisticirane konstitutivne zakone i izvoditi 3D simulacije (Guerber i sur., 1996). S druge strane, duboka podzemna kaverna dostupna je samo kroz tanku metalnu cijev koja je povezuje sa površinom zemlje. Podaci o konvergenciji su grubi, oskudni, a ponekad i netočni i čine točnost sofisticiranih modela nesigurnom. Mogu se prepoznati neke karakteristike ponašanja kamene soli: ponašanje soli je elastično-duktilno ako se razmotre kratkoročni testovi kompresije; elastično je krhko kada se uzmu u obzir ispitivanja vlačnog opterećenja.

Dugoročno se sol ponaša kao tekućina u smislu da teče čak i pod vrlo malim opterećenjem (engl. *deviatoric stresses*), ali čak se i u ovom slučaju puzanje u ustaljenom stanju (postignuto nakon nekoliko tjedana ili mjeseci) mora razlikovati od prolaznog puzanja (što djeluje tijekom razdoblja od nekoliko tjedana nakon primjene mehaničkog opterećenja).

Međutim, broj parametara koji se identificiraju laboratorijskim testovima za takve modele često je van dosega. Iz inženjerske perspektive, lakše je (i manje skupo) odabrati tipične situacije u kojima jedno ili drugo od različitih obilježja složenog ponašanja soli igra istaknutu ulogu, omogućujući tako da se ostali značajni aspekti u drugim kontekstima ne

zanemaruju. Prilikom izračunavanja količine fluida koja istječe iz kaverne kao posljedica erupcije ili količine vodene otopine soli koja se ubrizgava u kavernu kako bi nastao podtlak, važna je kompresibilnost (tj. elastična svojstva) fluidom ispunjene kaverne (Berest i sur., 2003).

Prilikom provođenja testa nepropusnosti, na početku kojih se tlak u kaverni brzo povećava, mora se uzeti u obzir kratkotrajno prolazno puzanje jer zanemareno može dovesti do grube pogrešne interpretacije rezultata ispitivanja. Konačno, oštećenje stijena i povezano hidromehaničko ponašanje moraju se uzeti u obzir i kad je tlak u kaverni vrlo nizak (Berest i sur., 2003) ili blizu geostatičkog tlaka.

Mnogi su drugi aspekti još uvijek otvoreni nedovoljno istraženi - na primjer, učinak sadržaja vlage u plinskim kavernama, mehanika loma, zacjeljivanje i sl.

3.6. Napuštanje kaverne

Posljednjih nekoliko godina postojala je bojazan zbog termohidromehaničkog ponašanja dubokih podzemnih solnih kaverna nakon njihova napuštanja. Zanimanje za dugoročno ponašanje takvih napuštenih kaverna povećalo se zbog zabrinutosti za zaštitu okoliša s jedne strane; i nekoliko novih projekata u kojima se kaverne koriste za odlaganje neopasnog, nuklearnog ili industrijskog otpada ili ugljičnog dioksida s druge strane.

U većini slučajeva kaverna se prije napuštanja napuni vodenom otopinom soli. Na petu kolone zaštitnih cijevi se postavi čelični čep, a u kanal bušotine sipa se cement, izolirajući slanu otopinu u kaverni. Nakon zatvaranja i napuštanja kaverne, tlak vodene otopine soli u kaverni će se povećati, što dokazuju mnogi testovi u zatvorenoj bušotini.

Konačna vrijednost tlaka vodene otopine soli od najveće je važnosti sa stajališta zaštite okoliša. Kao što je ranije navedeno, postoji određeni rizik da vodena otopina soli infiltrira kroz frakture do plitkih vodonosnih slojeva, što dovodi do zagađenja vode, urušavanja kaverne i zalijeganja površinskih slojeva. Posljedice će biti opasnije ako kaverna sadrži otpad.

Čimbenici koji pridonose povećanju tlaka

Stlačivost kaverne

Zatvorena kaverna ispunjena vodenom otopinom soli je kruto tijelo: malo smanjenje volumena kaverne ili malo povećanje volumena vodene otopine soli dovodi do značajnog povećanja tlaka vodene otopine soli.

Puzanje

U poglavlju „Stabilnost kaverne“ prikazano je da se solnim kavernama postupno smanjuje volumen: pokretačka snaga je razlika između geostatskog tlaka i unutarnjeg tlaka u kaverni. Kako se masa soli giba prema kaverni dolazi do stezanja kaverne čija je posljedica rast tlaka vodene otopine soli. Nakon nekog vremena proces stezanja postaje sporiji kako tlak u kaverni postaje veći, a konačno prestaje nakon nekoliko stoljeća kada je tlak u kaverni jednak geostatskom tlaku (Berest i sur., 2003).

Toplinska ekspanzija slane vode

Temperatura stijene raste s dubinom. Solne kaverne se izrađuju utiskivanjem vode koja se crpi iz plitkih vodonosnika. Prolazno vrijeme vode u kaverni je nekoliko dana ili tjedana - nedovoljno da se novonastala vodena otopina soli ugrije, što znači da je njena temperatura u kaverni na kraju faze ispiranja niža za nekoliko desetina Celzijevih stupnjeva od prirodne temperature stijena. Isto se može reći i za kavernu ispunjenu vodenom otopinom soli prije nego što se napusti. Početni temperaturni jaz između vodene otopine soli i stijene se polako smanjuje s vremenom kada fluidi više ne cirkuliraju. Proces zagrijavanja može biti dugačak i do nekoliko desetaka godina. Ugrijana vodena otopina soli ekspandira, što dovodi do povećanja tlaka u zatvorenoj kaverni (porast temperature od 1°C dovodi do porasta tlaka za otprilike 1 MPa). U većini slučajeva porast temperature je vodeći faktor, iako postoje iznimke kada je riječ o vrlo dubokim kavernama (You i sur., 1994).

Čimbenik koji pridonosi smanjenju tlaka u kaverni

Propusnost stijene

Halitne stijene imaju vrlo malu unutrašnju propusnost (K = od 10^{-22} m^2 do 10^{-20} m^2). U stvari, propusnost je toliko mala da se za njezino mjerenje ne koriste standardne tehnike koje se koriste za propusnije stijene (recimo, stijene propusnosti veće od K = 10^{-17} m^2) i malo je pouzdanih rezultata *in-situ* ispitivanja (Berest i sur., 2003).

Koliko su te brojke niske ilustrira jednostavan primjer u kojem je propusnost 10^{-20} m^2, a tlak u kaverni je veći od prirodnog tlaka pora u stijenskoj masi za 10 MPa. Tada će za kavernu volumena 100 000 m^3 značiti da istjecanje vodene otopine soli iznosi 1 m^3 godišnje. Čak i takvi vrlo mali i spori gubitci moraju se uzeti u obzir zbog dugotrajnog ponašanja kaverne. Zapravo se u tom kontekstu moraju razlikovati slabo propusne i nepropusne formacije.

U nekim slučajevima mikropropusnost slanih formacija omogućuje oslobađanje tlaka u zatvorenoj kaverni. Ta je tvrdnja istinita kada su se učinci toplinskog širenja vodene otopine soli raspršili (engl. *expansion effects of brine have dissipated*) i kada je propusnost stijena relativno visoka (K = 10^{-20}–10^{-19} m^2). Tada se može postići ravnotežno stanje ukoliko gubitak vodene otopine soli u stijenu točno uravnotežuje gubitak volumena kaverne uslijed puzanja (Berest i sur., 2003).

Kad je propusnost još manja (K <10^{-21} m^2) ne dolazi do značajnog oslobađanja tlaka u kaverni. Međutim, čak i u takvim formacijama može doći do stvaranja sekundarne propusnosti koja može biti dovoljna da omogući značajan gubitak vodene otopine soli (Berest i sur., 2003).

Stvaranje i ispuštanje sumporovodika

Skladištenje prirodnog plina u solnim kavernama može dovesti do opasnosti od stvaranja sumporovodika, što zauzvrat rezultira onečišćenim plinom. Ako koncentracija sumporovodika (H_2S) u skladištenom plinu premaši granicu od 5 mg/m^3, skladišteni plin je zagađen i više se ne može koristiti. H_2S nastaje redukcijom bakterijskog sulfata (engl. *bacterial sulfate reduction*) (Hemme i sur., 2017). Bakterije koriste tekući sulfat kao akceptor elektrona za oksidaciju otopljenih ugljikovodika i stvaranje sulfida. Anhidrit je

dostupan u halitnoj stijeni koja okružuje kavernu i djeluje kao izvor sulfata. Skladišteni prirodni plin, s glavnom komponentom metanom, u ravnoteži je sa slanom vodom i dodatno se dovodi difuzijom u vodenu otopinu soli. Stvoreni sumporovodik dospijeva do skladištenog plina isparavanjem iz vodene otopine soli. Količina nastalog H_2S uglavnom je kontrolirana količinom dostupnog sulfata, kao i brzinom difuzije koja je povezana s maksimalnim radnim vremenom solnih kaverna.

Da bi se osigurala stalna kvaliteta skladištenog prirodnog plina tijekom vremena, prirodni plin i vodena otopina soli moraju se kontinuirano analizirati, a tehničke metode se moraju primijeniti kada se koncentracija sumporovodika poveća. Prema rezultatima modeliranja, stvaranje H_2S inhibira se dodavanjem otopljenog željeza (engl. *dissolved ferrous iron*) u vodenu otopinu soli. Otopljeno željezo reagira sa sulfidom, čime nastaje željezov (II) sulfid, tako da vodeni sulfid više nije dostupan za stvaranje plinovitog H_2S. Druga metoda je dodavanje natrijevog hidroksida radi povećanja pH vrijednosti vodene otopine soli. Zatim se veće frakcije generiranog sulfida transformiraju u slobodni sumpor u tekućem stanju umjesto H_2S u plinovitom ili tekućem agregatnom stanju (Hemme i sur., 2017).

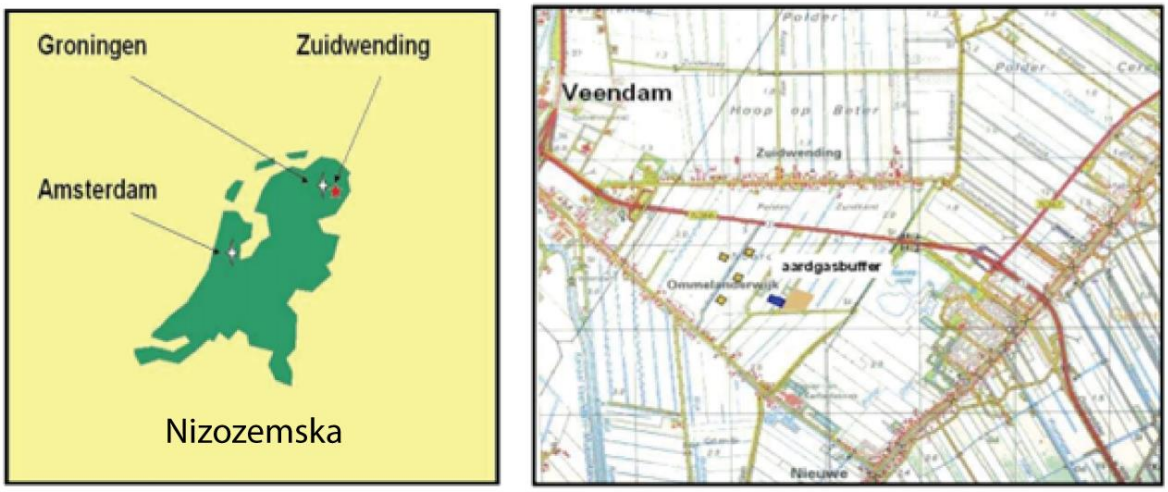
4. STUDIJA SLUČAJA - SKLADIŠTENJE PLINA U SOLNIM KAVERNAMA "AARDGASBUFFER ZUIDWENDING" U NIZOZEMSKOJ

Aidgasbuffer Zuidwending prvo je podzemno skladište prirodnog plina u solnim kavernama u Nizozemskoj. Iz iskustva je poznato da je cijena plina nepredvidiva i često vrlo nestabilna. Posljedično, kompanije Nuon i Gasunie uložile su svoja sredstva u izgradnju podzemnog skladišta plina u solnim kavernama zbog njihovih prednosti koje su navedene ranije u tekstu.

Kaverne za skladištenje plina izrađene su u solnim domama Zuidwending, jugoistočno od Veendama. Projekt je započeo 2003. godine, a izrada kaverne tri godine kasnije. Solna doma Zuidwending smještena je u susjedstvu plinskog polja Groningen, koje se nalazi ispod gotovo cijele provincije Groningen, na sjeveroistoku Nizozemske. Vrh kaverne nalazi se na oko 150 - 200 m ispod razine mora, dok je baza na 2800-3000 m ispod razine mora. Geometrijski volumen kaverni je od 650 000 do 1 000 000 m^3 (Hoelen i sur., 2006).

Lokacija projekta podzemnog skladišta prirodnog plina

Nizozemska međunarodna tvrtka Akzo Nobel od šezdesetih godina prošlog stoljeća proizvodi vodenu otopinu soli iz solnih doma na području Zuidwendinga, koja se prerađuje u sol u tvornicama u Delfzijlu oko 35 kilometara istočno od Zuidwendinga. Slika 4-1. pokazuje da se projekt skladištenja nalazi između tri sela: Zuidwending, Ommelanderwijk i Pekela. Dosadašnja izvrsna kvaliteta vodene otopine soli ukazuje na vrlo čistu solnu domu, minimizirajući geološki rizik izgradnje i upravljanja kavernama. Pored toga, blizina plinovoda i plinsko polje Groningen čine mjesto izuzetno povoljnim za skladištenje prirodnog plina (Hoelen i sur., 2006).



Slika 4-1. Lokacija projekta (Hoelen i sur., 2006)

Karakteristike PSPP Zuidwending

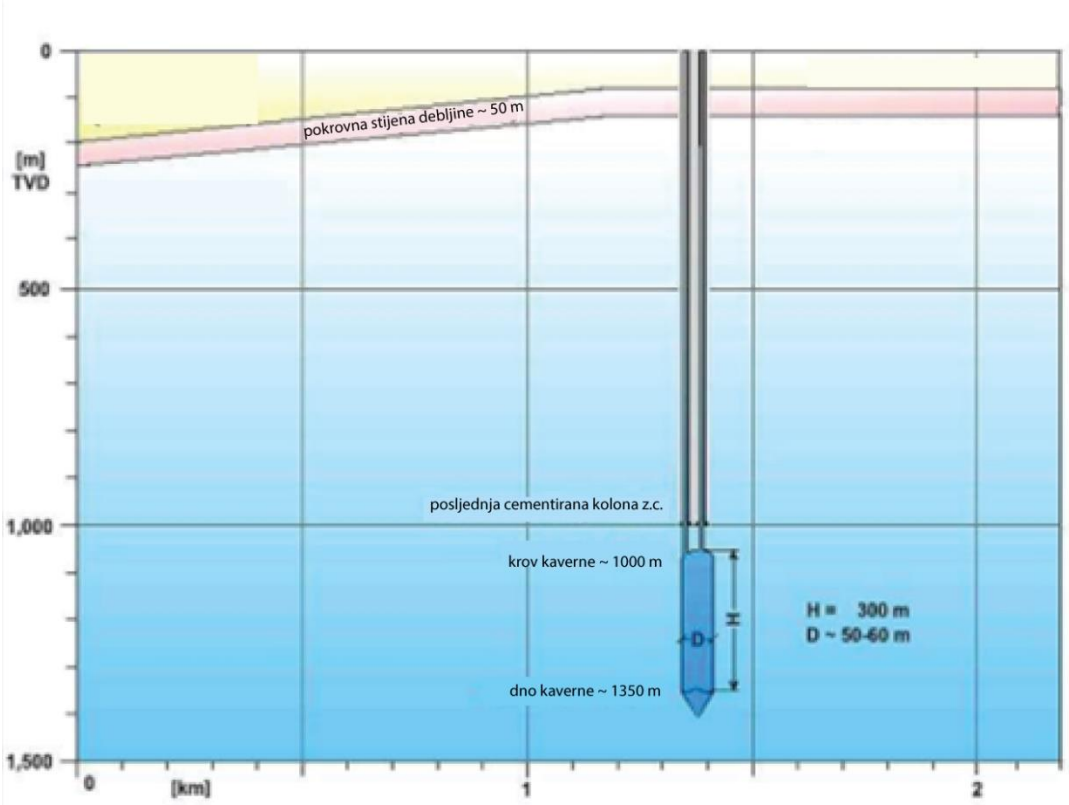
Glavne karakteristike skladišta Zuidwending prikazane su u tablici 4-1. Volumen pojedinih kaverna je 500 000 m. Dubina posljednje cementirane pete kolone zaštitnih cijevi je 1000 m, omogućujući maksimalni tlak skladištenja od 180 bara. Ova dubina također jamči vrlo malu konvergenciju kaverni. Opsežni izračuni temeljeni na postojećim kavernama za proizvodnju vodene otopine soli, a precizna mjerenja zalijeganja pokazala su da će zalijeganje površinskih slojeva zbog konvergencije kaverne biti neznatno.

Tablica 4-1. Karakteristike skladišta (Hoelen i sur., 2006)

Karakteristike podzemnog skladišta prirodnog plina	
broj kaverni	4
volumen kaverne (pojedinačne)	500 000 m^3
dubina posljednje cementirane kolone z.c.	1 000 m
dubina dna kaverne	1 350 m
radni volumen	180 milijuna m^3
brzina povlačenja (ukupno)	1,6 milijuna m^3/h
brzina utiskivanja (ukupno)	1,2 milijuna m^3/h

Dimenzije kaverni prikazane su na slici 4-2. Zbog očekivanih visokih brzina povlačenja i utiskivanja (400 000 m^3/h po kaverni), svaka je kaverna opremljena s dvije bušotine. Tehnički je moguće postići brzinu povlačenja/utiskivanja od 400 000 m^3/h sa samo jednim kanalom bušotine, međutim posljedica bi bila značajan pad tlaka. Štoviše, potrošnja energije

tijekom utiskivanja bila bi velika, posebno u slučaju učestalog utiskivanja (Hoelen i sur., 2006).



Slika 4-2. Dimenzije kaverna (Hoelen i sur., 2006)

Skladište prirodnog plina

Prirodni plin treba komprimirati prije skladištenja u solnoj kaverni. Budući da kompresijom dolazi do povećanja temperature, plin se prije utiskivanja mora ohladiti da se spriječe toplinska naprezanja kaverne i opreme. Kako bi se postigla velika fleksibilnost i učinkovitost, instalirano je ukupno šest kompresora, svaki kapaciteta 200 000 m³/h. Tijekom perioda povlačenja prirodnog plina, tlak, temperatura i točka rosišta plina trebaju se dovesti na vrijednosti plinske mreže. Za projekt Zuidwending, odabrana su tri 50% paralelna procesna pogona grijanja i prigušivanja (engl. *50 % parallel process trains of heating and choking*), nakon čega slijede dva 50% paralelna procesna pogona apsorpcijom glikola (engl. *50 % parallel process trains of glycol absorption*). Raspored cjevovoda je prilagođen radu jedne, dvije ili čak tri kaverne neovisno o ostalim kavernama, stoga sustav podržava dvije različite razine tlaka u kaverni (Hoelen i sur., 2006).

Zakonodavstvo i dozvole

Provedba projekta skladištenja plina zahtijeva razne dozvole. U slučaju Zuidwendinga, glavno zakonodavstvo koje obuhvaća različite postupke za dobivanje dozvola sastojalo se od Zakona o prostornom planiranju, Zakona o upravljanju okolišem i Zakona o rudarstvu. Prilagođavanje postojećeg plana prostornog uređenja pokazalo se kao najzahtjevnija procedura koja je trajala više od dvije godine zbog javnih rasprava, žalbi, savjetovanja s općinskim i pokrajinskim vlastima itd. Zahtjev za izdavanje okolišne dozvole zahtijeva Elaborat procjene utjecaja na okoliš, uključujući kvantitativnu procjenu rizika od potencijalnih opasnosti, poput puknuća cjevovoda, erupcije te eksplozije plina u elektrani. Kombinirani učinak svih tih potencijalnih opasnosti pokazao se niskim te u zakonskim granicama koje zahtijevaju nacionalna tijela. Zakon o rudarstvu zahtijevao je Plan iskorištavanja soli zbog izrade solne kaverne metodom rudarenja otapanjem, Plan skladištenja plina i zahtjev za izdavanjem dozvole za skladištenje plina. U doba realizacije projekta u bilo je potrebno zakonodavno regulirati skladištenje plina u kavernama izrađenim u solnim domama. Opisani projekt skladištenja plina stoga je predstavljao izazov i vlastima i projektnom timu (Hoelen i sur., 2006).

Procjena utjecaja na okoliš obuhvatila je sva relevantna područja kao što su (Hoelen i sur., 2006):

(a) utjecaj na tlo i površinske slojeve
(b) podzemne vode
(c) zvuk
(d) otpad
(e) emisije plinova u zraku
(f) krajolik.

Rezultati opsežnih izračuna dokazali su da će zalijeganje zbog skladištenja prirodnog plina u solnim kavernama biti minimalno.

Mogućnosti budućeg proširenja

U prvoj fazi ovog projekta skladištenja prirodnog plina izrađene su četiri kaverne. Budući da i Gasunie i Nuon predviđaju buduće potrebe za dodatnim kavernama, prostorni plan

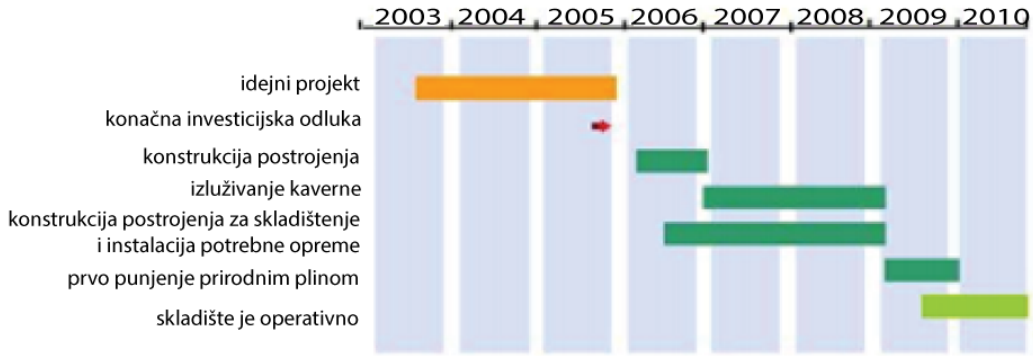
zoniranja i procjena utjecaja na okoliš već su prilagođeni kako bi se uzelo u obzir potencijalno proširenje. Naknadno je izrađena još jedna kaverna te ih je sada ukupno pet.

Investicija

Ukupna investicija za ovaj projekt iznosila je oko 350 milijuna eura, a sastoji se od postrojenja za ispiranje slatkom vodom, kaverne, kanala bušotine, uzlaznih i zaštitnih cijevi, poljskih cjevovoda, rudarenja otapanjem, prvog punjenja prirodnim plinom, plinskih objekata, priključka struje na visokonaponsku mrežu, kao i priključka na plinsku mrežu. Posebna pažnja posvećena je integriranju objekata u okoliš, gdje su u obzir uzete želje lokalnih stanovnika, koliko je to moguće (Hoelen i sur., 2006).

Gantogram projekta

Gantogram projekta prikazan je na slici 4-3. Projekt je započeo 2003. godine, a skladište je stavljeno u pogon 2010. godine. Projekt se sastojao od nabave potrebne dokumentacije i dozvola i izrade idejnog projekta (engl. *preproject*) te građevinskih i ostalih radova izrade kaverne koji su trajali tri godine. Prvo punjenje skladišta prirodnom plinom bilo je 2009. godine.



Slika 4-3. Gantogram projekta (Hoelen i sur., 2006)

Odnosi s javnošću

Svakih šest mjeseci kompanije su obavještavale lokalno stanovništvo uz mogućnost postavljanja pitanja o napretku projekta. Aktivno izvješćivanje lokalne zajednice predstavlja kvalitetnu interakciju za zainteresiranom javnošću i razmjenu informacija koja je obostrano korisna za realizaciju projekta.

5. TROŠKOVI IZRADE PODZEMNOG SKLADIŠTA PLINA U SOLNIM DOMAMA

Troškovi izrade podzemnog skladišta plina u solnim domama uključuju: postrojenje za ispiranje slatkom vodom, kaverne, kanale bušotine, uzlazne i zaštitne cijevi, cjevovode, postupak rudarenja otapanjem, prvo punjenje prirodnim plinom, plinske objekte, priključak struje na visokonaponsku mrežu i priključak na plinsku mrežu.

Prema studiji slučaja izrade PSPP u Nizozemskoj, troškovi izrade podzemnog skladišta plina u solnim domama ukupnog volumena kaverni 2 milijuna m^3 iznosili su oko 350 milijuna eura, odnosno 2,6 milijarde HRK. Zbog nedostataka detaljnih podataka, korišten je jednostavan izračun gdje su ukupni troškovi podijeljeni s ukupnim volumenom skladišta. Dobiven je rezultat troškova izrade podzemnog skladišta plina u solnim domama ~ 1 300 HRK/m^3, odnosno 175 EUR/m^3.

6. SOL – PROIZVODNJA I PRERADA

Sol ili natrijev klorid je bijeli, nezapaljiv, kristalni kemijski spoj male toksičnosti. Kuhinjska sol se u svakodnevnoj prehrani ljudi koristi kao začin. Osim toga, sol se obično primjenjuje na cestama i trotoarima kao sredstvo za odmrzavanje, a koristi se i kao sirovina za proizvodnju klora i natrijevog hidroksida, koji služe za izradu polivinilklorida (PVC-a) i kemikalije za preradu papira proizvedene od natrijevog hidroksida (Eu-China Energy and Environment Programme, 2009).

Godišnja svjetska proizvodnja soli je u 2019. godini iznosila 320 milijuna tona (Salt market report Indexbox, 2020); od čega Kina i SAD proizvedu 40%. Više od jedne trećine soli proizvodi se sunčevim isparavanjem morske vode. Trećina se dobiva rudarenjem kamene soli, kako iz podzemlja, tako i površinskom eksploatacijom. Ostatak se proizvede u obliku vodene otopine soli, uglavnom rudarenjem otapanjem.

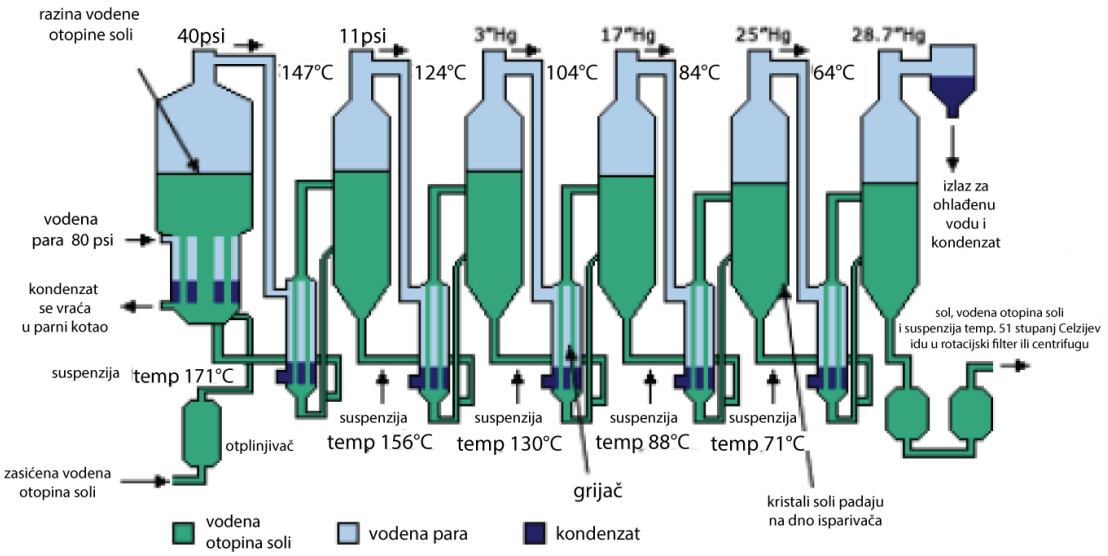
Kemijska industrija je najveći potrošač te koristi oko 60% ukupne proizvedene soli od koje daljnjom obradom nastaje klor, kaustična soda i soda pepeo. Druga najveća skupina korisnika soli je prehrambena industrija koja koristi približno 30% ukupne proizvedene soli, a preostalih 10% potrebno je za odmrzavanje cesta, obradu vode, proizvodnju rashladnih vodenih otopina soli i druge manje primjene (Eu-China Energy and Environment Programme, 2009).

6.1. Rafiniranje slane vode vakuumskom posudom

Rafinirana sol proizvodi se metodom rudarenja otapanjem i uklanjanjem vode iz vodene otopine soli koja se pumpa na površinu u velike spremnike za skladištenje.

Tipično postrojenje za preradu soli vakuumom prikazano na slici 6-1. sastoji se od niza zatvorenih cilindričnih posuda koje sadrže parne komore ispunjene brojnim cijevima. Voda isparava iz vodene otopine soli pomoću parnih isparivača s višestrukim učinkom ili električnih isparivača za rekompresiju pare. Sustavi s više učinaka obično sadrže tri ili četiri povezane posude za isparavanje s prisilnom cirkulacijom. Slana voda cirkulira kroz cijevi s kondenzacijom pare na vanjskoj površini. Prva posuda prima pare niskog tlaka u svoju parnu komoru. Slana voda ključa na temperaturi koju diktira tlak ulazne pare i voda isparava. To

stvara daljnju paru i uzrokuje rast kristala soli (Eu-China Energy and Environment Programme, 2009).



Slika 6-1. Postrojenje za preradu soli vakuumom (Eu-China Energy and Environment Programme, 2009)

Dok slana voda u prvoj posudi ključa i voda isparava, stvara se gusta suspenzija soli koja zatim u drugoj posudi cirkulira kroz drugu jedinicu grijača koja koristi ispušnu paru iz prve posude. Tlakovi i temperature ključanja postepeno se smanjuju u svakoj sljedećoj fazi (točka vrenja smanjuje se uz smanjeni tlak). Vakuumske posude mogu raditi s vrelištima do 400°C, dok završne faze rade pod vakuumom i omogućuju da slana voda ključa na puno nižim temperaturama, što je štedljivije. Suspenzija iz posljednje posude dovodi se u centrifugu za ekstrakciju slobodne vlage. Dobivena sušena vakuum sol zatim se skladišti u rasutom stanju za opskrbu kemijskom industrijom. Za prehrambenu industriju i srodne industrije potrebna je sušena sol. Sol iz centrifuge dovodi se u sušilice za hlađenje za daljnje sušenje. Sol se zatim prosijava i razvrstava prije nego što se prebaci u velike spremnike za distribuciju.

Isparivači rade pod vakuumom da bi smanjili energetske potrebe. Para iz kotlova se reciklira, tj. dovodi iz jednog isparivača u drugi kako bi se povećala energetska učinkovitost u sustavu s više učinaka. Isparivači s prisilnom cirkulacijom kompresije pare sastoje se od kristalizatora, kompresora i sredstva za pročišćavanje pare. Zasićena vodena otopina soli ulazi u posudu kristalizatora, gdje se taloži sol (Eu-China Energy and Environment Programme, 2009.). Para se pročišćava i komprimira za ponovnu upotrebu u grijaču. Kristalizirana sol se odstrani iz suspenzije, preostala voda se odstrani u centrifugi, sol se

dodatno osuši u rotacijskoj peći ili sušilici, obradi s dodacima (npr. kalijevim jodidom) i zapakira. U svim vakuumskim posudama za rafiniranje slana voda preostala nakon kristalizacije soli obično se utiskuje nazad u solnu kavernu. Manje uobičajena metoda proizvodnje isparene soli je manje energetski učinkovita metoda, u kojoj se sol kristalizira u otvorenim posudama poznatim kao "uzgajivači" (engl. *grainers*).

Slana voda se kemijski pročišćava i pumpa u dugu otvorenu posudu zagrijanu parom koja prolazi kroz cijevi uronjene u slanu vodu. Slana voda se zagrijava na temperaturu malo ispod točke ključanja i na njenoj površini formiraju se pahuljice soli kako voda isparava. Obično se koristi temperatura od oko 90°C. Niže temperature proizvode veće pahuljice, a više temperature stvaraju manje pahuljice. Pahuljice rastu dok ne potonu na dno posude, gdje se sakupljaju i suše. Zrnata sol sastoji se od sitnih pahuljica, a ne od kockica, a preferira se za određene namjene u preradi hrane. Ponekad se upotrebljava Albergerov postupak, u kojem je vodena otopina soli najprije djelomično isparena u vakuumskom isparivaču, a zatim premještena u otvorenu posudu. Ovim se postupkom dobiva mješavina pahuljica i kockica (Eu-China Energy and Environment Programme, 2009).

6.2. Odlaganje vodene otopine soli

Povijesno su tri najčešća načina odlaganja vodene otopine soli bila ispuštanje u površinske vode, ispuštanje u površinske ribnjake i utiskivanje u duboke bušotine. Međutim, zbog ekoloških problema kao što su onečišćenje tla i podzemnih voda, ispuštanje u površinske vode i odlaganje u površinske ribnjake obeshrabruje se ili zabranjuje propisima. Pri utiskivanju vodene otopine soli u utisne bušotine manji su problema s očuvanjem okoliša u usporedbi s drugim opcijama, ali zahtijeva odgovarajući vodonosnik (Duhan, 2018).

Idealna formacija za odlaganje vodene otopine soli je izotropna, homogena, jednolike debljine i ne sadrži propusne puteve do drugih formacija. Međutim, u stvarnosti formacije za zbrinjavanje obično pokazuju anizotropiju i heterogenost, poput različitih vodoravnih i vertikalnih propusnosti.

Tlak utiskivanja od najveće je važnosti u bilo kojem projektu odlaganja slane vode. Poželjni su niski tlakovi utiskivanja kako bi se izbjegla površinska oprema velike snage (visokotlačna utisna pumpa) koja povećava troškove projekta. Osim troškova, visoki tlakovi utiskivanja mogu dovesti do potencijalnih problema sa stabilnošću pokrovne stijene (Duhan, 2018)

Propusnost se definira kao sposobnost stijena da omogući protjecanje fluida kroz šupljine. To je najvažniji parametar odlaganja vodene otopine soli u vodonosnike, jer je glavni cilj navedenog postupka skladištenje i prijenos fluida kroz formaciju. Tlak utiskivanja također u velikoj mjeri ovisi o propusnosti; mala propusnost zahtijeva visok tlak utiskivanja što projekt može učiniti skupim, pa čak i nepraktičnim.

Poroznost se definira kao udjel volumena pora u ukupnom volumenu stijene. Zapravo se poroznost dalje razvrstava u dvije kategorije: ukupna poroznost i efektivna poroznost. Ukupna poroznost je omjer svih pora u stijeni i ukupnog volumena stijene. Efektivna poroznost je omjer volumena međusobno povezanih pora i ukupnog volumena stijene. U odlaganju vodene otopine soli važna je samo efektivna poroznost. Kao referentnu vrijednost, poželjne su vrijednosti poroznosti veće od 15% za velike operacije odlaganja vodene otopine soli (Duhan, 2018).

Minimalna i maksimalna ograničenja dubine utiskivanja ovise o ekološkim restrikcijama i troškovima bušenja. Maksimalno ograničenje dubine kontrolira se cijenom bušenja i opreme. Bušenje je skupo, a dublja odlagališta mogu značajno povećati kapitalne troškove projekta. Također, na dublje formacije djeluju veći litostatski tlakovi i zato im je potreban veći tlak utiskivanja da bi se održao protok. Zapravo, u dubljim formacijama mogući su litostatski tlakovi toliko visoki da postupak odlaganja nije izvediv.

Debljina kanala bušotine važan je parametar zbog utjecaja na propusnost i tlak utiskivanja, kao i na raspoložive količine skladištenja. Debljina formacije za odlaganje također kontrolira širenje utisnutog fluida. U usporedbi dviju homogenih formacija slične efektivne propusnosti, vodena otopina soli se proširi dalje u tanku formaciju u usporedbi s gustom formacijom (Duhan, 2018). Izazov utiskivanja u tanki vodonosni sloj je prihvaćanje vodene otopine soli. Tipično, samo nekoliko metara površine od bušotine prihvaća veliku količinu fluida.

Svi oblici odlaganja zahtijevaju pokrovnu stijenu koja injektiran fluid ograničava u formaciji za odlaganje. Glavni zahtjevi odgovarajuće pokrovne stijene su nepropusnost za fluid, čvrstoća, debljina i kontinuitet. Pokrovna stijena bi trebala biti nepropusna i bez oštećenja, kako se vodena otopina soli ne proširila izvan formacije za odlaganje. Također, trebala bi biti gusta i neprekidna; debeli sloj pokrovne stijene pruža dodatnu zaštitu u projektima plitkog odlaganja gdje je udaljenost između formacije podzemne vode i odlagališta samo nekoliko metara.

Za uspješno dugoročno zbrinjavanje potrebno je da tlak u vodonosniku bude ispod određenih granica koje ovise o ostalim čimbenicima kao što su propusnost i volumen ležišta. Visok tlak u formaciji povećao bi operativne troškove zahtijevajući veći tlak utiskivanja. Uz to, visoki tlakovi utiskivanja potrebni za postizanje projektnih stopa mogu uzrokovati ekološke probleme oštećujući pokrovnu stijenu i eventualno zagađujući druge formacije.

7. POTENCIJAL SOLNIH KAVERNI ZA SKLADIŠTENJE VODIKA U EUROPI

Uloga vodika u budućem energetskom sustavu s visokim udjelom različitih obnovljivih izvora energije smatra se ključnom za uravnoteženje kolebanja u proizvodnji električne energije. Ove fluktuacije mogu se nadoknaditi fleksibilnom proizvodnjom i većim kapacitetom skladištenja. Skladištenje u solnim kavernama je najperspektivnija tehnologija zbog velikog kapaciteta skladištenja i velikih brzina utiskivanja/povlačenja. D. Gulcin Cagalayan i sur. su radom „*Tehnical Potential of Salt Cavern for Hydrogen Storage in Europe*“ ocijenili prikladnost europskih struktura podzemnih ležišta soli i solnih doma za skladištenje vodika u smislu veličine, podobnosti zemljišta i kapaciteta. Razmatrane su dvije različite veličine kaverna: od 500 000 m^3 i 750 000 m^3. Kapaciteti skladištenja pojedinih kaverna procjenjuju se na osnovu termodinamičkih razmatranja na temelju podataka specifičnih za lokaciju.

Za razliku od mehaničkog skladištenja energije, skladištenje upotrebom kemijskih nosača energije kao što su vodik ili prirodni plin osigurava približno 100 puta veću gustoću energije od skladištenja komprimiranog zraka za isti volumen skladištenja. Alternativni nosač energije je vodik, koji se može proizvesti korištenjem koncepta „*Power to Gas“*. Pored korištenja vodika u električnim vozilima sa gorivim ćelijama, on se može ubacivati i u gorive ćelije za proizvodnju električne energije za kompenzaciju razdoblja male generacije *(„Power to Power“*). Za sezonsko skladištenje su podzemne solne kaverne povoljnije od nadzemnih skladišta.

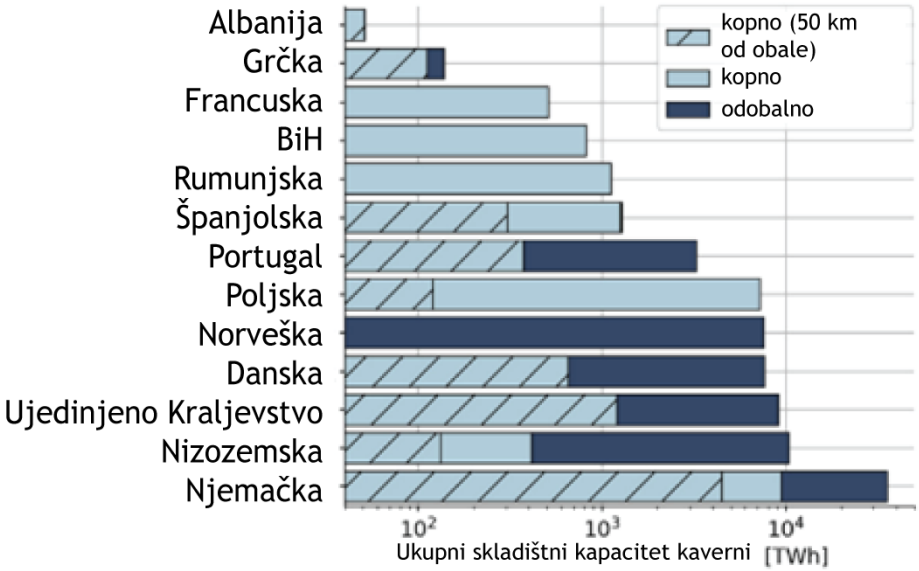
Skladištenje prirodnog plina u podzemnim kavernama prakticira se već desetljećima. Znanje stečeno ovim postupkom može se lako prenijeti za skladištenja vodika zbog sličnosti u konstukciji, izgradnji i radu kaverne (Cagalayan DG i sur., 2019). Glavne razlike između skladišta vodika i prirodnog plina je u infrastrukturi pristupnih bušotinama i ušća bušotine te nadzemnom cjevovodu. U slučaju vodika, krtost, odnosno pucanje pod naprezanjem (engl. *embrittlement*) uslijed dugotrajne difuzije može uzrokovati istjecanje i oštećenja, posebice čeličnih materijala.

Trenutno postoji samo nekoliko mjesta za skladištenje vodika u solnim kavernama u Velikoj Britaniji (npr. Teesside) i Sjedinjenim Državama (npr. Clemens Dome, Spindletop, Moss Bluff). U Teeside-u se od 1970-ih skladišti vodik u solnim kavernama eliptičnog

oblika na dubini 350-450 m i ukupnom volumenom od 210 000 m^3. Solne kaverne u Clemens Dome-u i Moss Bluff-u izgrađene su u solnim domama na dubini od 800 m (vrh kaverne), volumena približno 580 000 m^3. Clemens Dome i Moss Bluff su u pogonu od 1983. godine i 2007. godine. Ovi su projekti nedvosmisleno pokazali da je podzemno skladištenje vodika tehnički izvediva opcija (Cagalayan DG i sur., 2019).

Studija HyUnder obuhvaća 5 europskih zemalja te predlaže ukupni broj kaverni potrebnih za 2050. godinu, od čega se 74 nalazi u Njemačkoj, 43 u Nizozemskoj, 24 u Španjolskoj, 21 u Velikoj Britaniji i 1 u Rumunjskoj. Procjene se provode uz pretpostavku standardne solne kaverne volumena 500 000 m^3, što odgovara skladišnom kapacitetu vodika od 133 GWh (Cagalayan DG i sur., 2019).

Ukupni europski nacionalni skladišni kapaciteti prikazani su na slici 7-1., s tri klasifikacije: na kopnu, na kopnu do 50 km od obale i na obali. Zemlje su razvrstane prema njihovom ukupnom potencijalu za skladištenje vodika. Kapaciteti odobanih kaverna predstavljaju kaverne smještene u solnim domama lociranim na Sjevernom moru, dok se „kopnene“ odnose na preostale kaverne smještene na kopnu (nakon primjene ograničenja prihvatljivosti). Konačno, dodatno ograničenje udaljenosti od 50 km od obale uključeno je u projekciju potencijalnog skladištenja. Ovo ograničenje dodaje se kako bi se uzela u obzir ekonomska i ekološka ograničenja u pogledu odlaganja vodene otopine soli tijekom izgradnje kaverna, jer odlaganje u jezera i rijeke nije moguće zbog visokog sadržaja soli. Iako se kapacitet u Njemačkoj ne mijenja značajno s uvođenjem ograničenja od 50 km, zemlje poput Francuske, BiH i Rumunjske ne zadržavaju svoj kapacitet zbog velikih udaljenosti od obale. Nasuprot tome, kapaciteti Ujedinjenog Kraljevstva, Danske, Grčke i Portugala ne mijenjaju se zbog blizine obale soli.



Slika 7-1. Ukupni potencijal europskih zemalja za skladištenje vodika u solnim kavernama (Cagalayan DG i sur., 2019).

Sveukupno, europski potencijal skladištenja vodika u solnim kavernama je 84,8 PWh. Međutim, potencijal skladištenja u solnim kavernama smještenim na kopnu i priobalju (do 50 km od obale) procjenjuje se na svega 23,2 PWh, od čega se 19,0 PWh nalazi u solnim domama. Većina zemalja ima i kopnene i odobalne mogućnosti skladištenja, osim Norveške gdje postoji samo mogućnost izrade odobalnog skladišta vodika u solnim domama.

Najveći potencijal za izradu kopnenih skladišta vodika uočen je u Njemačkoj (9,45 PWh), a slijede Poljska i Španjolska (7,24 PWh i 1,26 PWh). Te tri zemlje predstavljaju 77% ukupnog potencijala za skladištenje na kopnu. Unatoč rasprostranjenim ležištima soli u Francuskoj, potencijal kopnenog skladištenja procjenjuje se na 510 TWh, što je samo 2% ukupnog skladišnog potencijala. To je uglavnom zbog toga što se nalazišta soli najčešće nalaze oko gusto naseljenih područja.

8. ZAKLJUČAK

Podzemna skladišta prirodnog plina izrađena u solnim domama sigurnija su od ostalih skladišta. Izrada kaverni u solnim domama izvodi se postupkom rudarenja otapanjem koji podrazumijeva injektiranje vode koja se crpi iz plitkih vodonosnika za otapanje soli i proizvodnju vodene otopine soli. Opći zahtjevi solnih kaverni moraju biti ispunjeni tijekom cijelog životnog vijeka kaverne, a obuhvaćaju dovoljnu statičku stabilnost, pouzdanu nepropusnost kaverne i kanala bušotine, prihvatljivo zalijeganje površinskih slojeva, napuštanje kaverne u skladu s ekološkim zahtjevima, maksimalan kapacitet skladištenja plina, visoku operativnu uspješnost i malu konvergenciju te učinkovitu i dugoročnu upotrebljivost. Tijekom napuštanja podzemnog skladišta prirodnog plina u solnim domama u obzir treba uzeti dugoročnu zaštitu okoliša uz sigurno i ekonomično rješenje. Razmatrano je nekoliko mogućnosti napuštanja solne kaverne, međutim punjenje kaverne vodom ili slanom vodom uz trajno zatvaranje bušotine je trenutno opće prihvaćeno rješenje, kako iz ekonomskih razloga, tako i zbog odobravanja javnosti. Skladištenje prirodnog plina u podzemnim kavernama prakticira se već desetljećima, a stečeno znanje može se lako prenijeti za skladištenja vodika čija će uloga u budućem energetskom sustavu s visokim udjelom različitih obnovljivih izvora energije biti ključna za uravnoteženje elektroenergetskih sustava.

9. LITERATURA

Knjige:

1. ABESSI, O., 2018. Brine Disposal and Management: Planning, Design, and Implementation. Sustainable Desalination Handbook, str. 259-303.
2. BEREST, P., BROUARD, B., 2003. Safety of Salt Caverns Used for Underground Storage Blow Out: Mechanical Instability, Seepage, Cavern Abandonment. Oil & Gas Science and Technology, 58(3), str. 361-384.
3. BOUCLY Ph., LEGRENEUR, J., 1980. Hydrocarbon Storage in Cavities leached out of Salt Formations. Proc. Int. Symp. Rock Store, M. Bergman ed., Pergamon, str. 251-257.
4. CHEN, J., REN, S., CHUNHE, Y., JIANG, D., 2013. Self-Healing Characteristics of Damaged Rock Salt under Different Healing Conditions. Materials 6(2013), str. 3438-3450.
5. DUHAN, J., 2018. Compressed Air Energy Storage in Salt Caverns: Geomechanical Design Workflow, CAES Siting Study from a Geomechanics Perspective, and Deep Brine Disposal. University of Waterloo, Ontario, Canada.
6. EU-CHINA ENERGY AND ENVIRONMENT PROGRAMME, 2009. Salt Production: A reference book for the industry.
7. GUERBER, B., DURUP J.G., 1996. A Few applications of the utilization of a 3D geomechanical code for underground storage cavern design and stability studies. Proc. SMRI Spring Meeting, Houston.
8. GULCIN CAGALAYAN, D., WEBER N., HEINRICHS, H., LINßEN, J., ROBINIUS, M., KUKLA P., STOLTEN D., 2019. Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe. International Journal of Hydrogen Energy, 11(45), str. 6793-6805.
9. HEMME, C., BERK, W., 2017. Potential risk of H2S generation and release in salt cavern gas storage. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 47(2017), str. 114-123.
10. HOELEN, Q., PIJKEREN G., TEUBEN, B., STEENBERGEN, B., BREUNING, P., 2006. Gas Storage in Salt Caverns "Aardgasbuffer Zuidwending" the Netherlands. 23rd World Gas Conference, Amsterdam.

11. KNOWLES, D.W., 1995. Brine Handling and Disposal by Reinjection. Society of Petroleum Engineers.
12. LUX, K.-H., 2009. Design of salt caverns for the storage of natural gas, crude oil and compressed air: Geomechanical aspects of construction, operation and abandonment. The Geological Society, 313, str. 93–128.
13. NGUYEN M. D., BRAHAM, S., DURUP J.G., i sur., 1993. A tentative interpretation of long-term surface subsidence measurements over a solution mined cavern field. Proc. 7th Symp. on Salt, str. 441-450.
14. PANAGOPOULOS, A., 2019. Desalination brine disposal methods and treatment technologies: A review. Science of the Total Environment, 693(2019).
15. PERIĆ, M., 2007. Englesko hrvatski enciklopedijski rječnik istraživanja i proizvodnje nafte i plina. Zagreb: INA Industrija nafte.
16. RAPP, E., B., 2017. Microfluidics: Modeling, Mechanics and Mathematics. Amsterdam: Elsevier Inc.
17. RÖHR, H.U.,1974. Mechanical behavior of a gas storage cavern in evaporitic rocks. Proc. 4th Symp. on Salt, Salt Institute, 2. izd, str.93-100.
18. SADD, H., M., 2005. Elasticity: Theory, Applications, and Numerics. Amsterdam: Elsevier Inc.
19. YOU Th., 1994. Experimental procedures for the closure of the brine production caverns of the “Saline de Vauvert” site. Proc. SMRI Fall Meeting, Hannover.
20. WARREN, J.K., 2016a. Evaporites: A Geological Compendium. 2. izd. Cham: Springer International Publishing Switzerland, str. 1303-1374.
21. WARREN, J.K., 2016b. Salt usually seals, but sometimes leaks: Implications for mine and cavern stabilities in the short and long term. Earth-Science Reviews, 165(2017), str. 302-341.

Web izvori:

22. IEA, 2020. Gas. URL: https://www.iea.org/fuels-and-technologies/gas (03.08.2020.)
23. INDEXBOX, 2020. Global Salt Market Overview 2020. URL: https://www.indexbox.io/store/world-salt-market-report-analysis-and-forecast-to-

2020/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_term=%252Bsalt%2520%252Bconsumption&utm_campaign=World-Market-Asia&gclid=EAIaIQobChMIz52Y4fvj7AIVPBoGAB0aigZMEAAYAiAAEgJ7x_D_BwE (18.11.2020)

24. NATURAL GAS, 2020. Storage of Natural Gas. URL: http://naturalgas.org/naturalgas/storage/ (15.10.2020.)
25. STRUNA, 2020. Diskretizacija. URL: http://struna.ihjj.hr/naziv/diskretizacija/30869/ (23.07.2020.)

IZJAVA

Ja, Monika Bakalović, izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno, služeći se navedenom literaturom, na temelju znanja stečenih tijekom studiranja na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu i uz stručno vodstvo mentorice prof. dr. sc. Darije Karasalihović Sedlar.

Monika Bakalović

Monika Bakalović

KLASA: 602-04/20-01/226
URBROJ: 251-70-03-20-2
U Zagrebu, 20.11.2020.

Monika Bakalović, studentica

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM: 602-04/20-01/226, UR. BROJ: 251-70-12-20-1 od 29.10.2020. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

IZRADA PODZEMNIH SKLADIŠTA PRIRODNOG PLINA U SOLNIM DOMAMA

Za voditeljicu ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o diplomskom ispitu dr. sc. Daria Karasalihović Sedlar, redovita profesorica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Voditeljica

(potpis)

Prof. dr. sc. Daria Karasalihović Sedlar

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za završne i diplomske ispite

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Vladislav Brkić

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor Kuhinek

(titula, ime i prezime)