

Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Studij naftnog rudarstva

**SVOJSTVA LEŽIŠNIH STIJENA POGODNIH ZA ODLAGANJE  
NUKLEARNOG OTPADA**

Diplomski rad

Lidija Perić

N2035

Zagreb, 2012.

## **SVOJSTVA LEŽIŠNIH STIJENA POGODNIH ZA ODLAGANJE NUKLEARNOG OTPADA**

LIDIJA PERIĆ

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

### **Sažetak**

Pronalazak rješenja za zbrinjavanje nuklearnog otpada ključno je pitanje, ne samo za zaštitu okoliša, nego i za budućnost nuklearne industrije. Odlagališta nuklearnog otpada trebaju osigurati da taj otpad ne napusti odlagalište tisućama godina. Iako je nuklearni otpad pohranjen u spremnike, koji su planirani da izdrže i najekstremnije uvjete, moguće je širenje produkata odlagališta kroz sloj u kojem se pohranjuje otpad, te je stoga osnovni zadatak istraživanja odlagališta definirati da ne postoje putevi kroz koje bi fluidi mogli migrirati. Za takvu procjenu, potrebno je definirati geološki model pomoću bušotinske karotaže, te 3D i 4D seizmike, kao i petrofizikalne parametre za proračune i simulacije protoka unutar promatrane strukture. Za potvrdu proračuna ili korekciju ulaznih podataka za proračune protoka, koristi se još i ispitivanje promjena tlakova u bušotini. Radi poluempirijskog karaktera interpretacije mjerenih podataka, neka mjerenja i proračune je u manjoj mjeri potrebno modificirati za posebni slučaj odlaganja nuklearnog otpada.

Ključne riječi: nuklearni otpad, podzemno odlaganje, petrofizikalne analize

Diplomski rad sadrži: 34 stranice, 0 tablica, 13 slika i 40 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentor: Dr. sc. Domagoj Vulin, docent RGNf-a

Ocjenjivači: Dr. sc. Domagoj Vulin, docent RGNf-a  
Dr. sc. Lidia Hrnčević, docentica RGNf-a  
Dr. sc. Tomislav Kurevija, docent RGNf-a

Datum obrane: 31. 05. 2012.

**RESERVOIR ROCK PROPERTIES THAT ARE SUITABLE FOR  
NUCLEAR WASTE DISPOSAL**

LIDIJA PERIĆ

Thesis completed in: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Petroleum Engineering Department  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

**Abstract**

Finding a solution for nuclear waste disposal is a key issue, not only for the protection of the environment but also for the future of nuclear industry. Nuclear waste repositories should be designed in order to maintain the waste for several thousand years. Although the waste is stored in tanks that can persist the most extreme conditions, it is necessary to ensure that gases that can come into existence nearby the storage tank will not spread far from the repository well, so the main task is to determine if there is possibility of leakage pathways in the repository rock. That requires exploration in order to define geological model, by utilisation of well logging, 3D and 4D seismic measurements. Petrophysical measurements give data required for well-log calibration and input data for reservoir flow calculations and simulations. Well testing of pressure changes can give validation of lab data and can be use in order to correct input data for flow calculations. Because of semi-empirical nature of the measured data interpretation, some testing and calculation methods should be slightly modified for nuclear waste repository.

Keywords: nuclear waste, underground disposal, petrophysical analyses

Thesis contains: 34 pages, 0 tables, 13 figures and 40 references

Original in: Croatian

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

Supervisor: PhD. Domagoj Vulin, Assistant Professor

Reviewers: PhD. Domagoj Vulin, Assistant Professor  
PhD. Lidia Hrnčević, Assistant Professor  
PhD. Tomislav Kurevija, Assistant Professor

Date of defense: 31<sup>st</sup> May 2012

## Sadržaj:

Popis korištenih oznaka .....	vi
Popis slika .....	viii
1. Uvod .....	1
2. Odlaganje radioaktivnog otpada u dubokim geološkim formacijama.....	3
3. Tehnike ispitivanja petrofizikalnih svojstava stijena u podzemnom skladištu nuklearnog otpada.....	6
3.1. Osnovne petrofizikalne analize.....	8
3.1.1. Analiza prirodne radioaktivnosti-utvrđivanje dubine geološke formacije litološkog sastava pogodnog za skladištenje nuklearnog otpada.....	9
3.1.2. Mjerenje poroznosti .....	10
3.1.3. Mjerenje plinske (apsolutne) propusnosti .....	13
3.2. Specijalne petrofizikalne analize .....	16
3.2.1. Mjerenje stlačivosti pora .....	16
3.2.2. Određivanje relativnih propusnosti .....	17
3.2.3. Mjerenje kapilarnih tlakova u stijeni .....	19
3.3. Ispitivanja metodom pada tlaka .....	21
4. Sličnosti i razlike skladištenja nuklearnog otpada i CO <sub>2</sub> .....	26
4.1. Uskladištenje CO <sub>2</sub> .....	26
4.2. Usporedba zbrinjavanja CO <sub>2</sub> i nuklearnog otpada .....	27
5. Zaključak.....	30
6. Literatura .....	32

## Popis korištenih oznaka:

$A$  - protočna površina,  $m^2$

$B$  - volumni faktor,  $m^3/m^3$

$c_p$  - kompresibilnost pora,  $bar^{-1}$

$h$  - efektivna debljina protočnog intervala, m

$I_{in}$  – indeks injektivnosti,  $m^3/dan/bar$

$k$  - koeficijent apsolutne propusnosti,  $m^2$

$k_r$  - relativna propusnost

$k_{rwt}$  – relativna propusnost nemoćive faze

$l$  - duljina protočnog segmenta, m

$m$  - nagib

$S$  - zasićenje, dij. jed. (ili %)

$p_{in}$  – tlak injektiranja, bar

$\bar{p}$  - prosječni tlak, bar

$p_1$  - tlak na početku protočnog segmenta, bar

$p_2$  - tlak na kraju protočnog segmenta, bar

$p_e$  - tlak ekspanzije u porozimetru, bar

$P_c$  - kapilarni tlak, Pa

$\bar{p}$  - srednji tlak protjecanja, bar

$q$  - volumni protok,  $m^3/s$

$\bar{q}$  - prosječni volumni protok,  $m^3/s$

$V_b$  - ukupni (vanjski) volumen uzorka,  $\text{cm}^3$

$V_p$  - volumen pora uzorka,  $\text{cm}^3$

$V_{mk}$  - volumen mjerne komore porozimetra,  $\text{cm}^3$

$V_{ref}$  - volumen referentne komore porozimetra,  $\text{cm}^3$

$V_s$  - Volumen zrna uzorka,  $\text{cm}^3$

$\mu$  - viskoznost, mPas

$\theta$  - kut močivosti, rad

$\phi$  - poroznost, dij. jed.

$\Delta p_{ef}$  - promjena efektivnog tlaka, bar

$\sigma$  - površinska napetost, dyn/cm

## **Popis slika:**

Slika 2.1. Odlaganje nuklearnog otpada.....	4
Slika 2.2. Spremnik nuklearnog otpada .....	5
Slika 2.3. Općeniti prikaz odlaganja radioak. otpada .....	5
Slika 3.1. Shematski prikaz uređaja za mjer. poroznosti .....	11
Slika 3.2. Kalibracijske krivulje .....	12
Slika 3.3. Model linearnog protoka.....	13
Slika 3.4. Shema uređaja za mjerenje propusnosti.....	14
Slika 3.5. Korekcija za Klinkenbergov efekt .....	15
Slika 3.6. Prikaz odnosa zasićenja .....	17
Slika 3.7. Relativne propusnosti.....	18
Slika 3.8. Krivulja kapilarnog tlaka .....	20
Slika 3.9. Testovi porasta i pada tlaka .....	24
Slika 4.1. Mehanizmi potencijalnog propuštanja.....	27

## 1. Uvod

Rješavanje problema zbrinjavanja iskorištenog nuklearnog otpada jedno je od najvažnijih pitanja kojim se bave znanstvenici, ne samo zbog zaštite ljudi i okoliša, već i zbog budućnosti nuklearne industrije. Sigurnost, tehnička izvedivost i isplativost ključni su aspekti koji pri tome razmatraju.

Radioaktivni materijali koji se koriste u različitim primjenama nakon nekog vremena postaju, djelomično ili potpuno neupotrebljivi, ali često i dalje zadrže veliki dio radioaktivnosti koju su imali ili stekli za vrijeme uporabe. Ako ih se ne može preraditi za ponovno ili daljnje korištenje, radioaktivne tvari se klasificiraju kao radioaktivni otpad.

Radioaktivnost se s vremenom smanjuje, te može postati neznatna već nakon nekoliko dana ili mjeseci, ali i isto tako otpad može ostati opasno radioaktivan još dugi niz godina.

Kada se govori o konačnom odredištu takve vrste otpada, odnosno o njegovom zbrinjavanju, najvažnije svojstvo koje se razmatra je radioaktivnost, pa se upravo na razlikama u radioaktivnim svojstvima temelje najvažnije klasifikacije radioaktivnog otpada.

Radioaktivni se otpad dijeli u tri osnovne kategorije (Šabović i dr., 2009.):

- Niskoaktivni otpad kojeg karakterizira nisko specifično gama i beta zračenje (ispod 5 milijardi Bq/m<sup>3</sup>) i s zanemarivim sadržajem aktinida. Aktinidi su teški elementi s rednim brojem većim od 89.
- Srednjeaktivni otpad sadrži samo gama i beta zračenje, uz zanemariv sadržaj aktinida, ali s većom aktivnošću nego kod niskoaktivnog otpada (do 5.000 milijardi Bq/m<sup>3</sup>).
- Visokoaktivni otpad karakteriziraju više specifične aktivnosti od navedenih i veći sadržaj aktinida.

Niskoaktivni i srednjeaktivni otpad potječe iz pogona nuklearnih elektrana, dok treća vrsta dolazi iz postrojenja za preradu istrošenog nuklearnog goriva i čini 90% ukupne radioaktivnosti nuklearnog otpada.



Razvijen je niz provjerenih tehnoloških postupaka kojima se radioaktivni otpad priređuje za odlaganje, a uvriježili su se i standardni nazivi (obrada, odlaganje) za pojedine procese (Levanat, I. 1997).

Prvi korak pripreme radioaktivnog otpada za odlaganje sastoji se od sakupljanja i razvrstavanja otpada, te dekontaminacije i manjeg kemijskog prilagođavanja. *Obrada* radioaktivnog otpada sastoji se od niza postupaka kojima je svrha povećati sigurnost ili ekonomičnost pohranjivanja otpada promjenom njegovih svojstava, a temeljni koncepti obrade su smanjivanje obujma otpada, uklanjanje radionuklida i promjena sastava otpada. *Odlaganje* je smještanje otpada u odlagalište, bez namjere da se iz njega ikada vadi i bez nužnog oslanjanja na dugoročno nadgledanje i održavanje odlagališta. Bitno se, međutim, razlikuje pojam *skladištenja*, koji označava privremeno čuvanje radioaktivnog otpada.

Poluvijek radionuklida (vrijeme poluraspada) jedna je od najbitnijih odrednica u odlučivanju o načinu odlaganja. Otpad koji sadrži pretežno kratkoživuće radionuklide čuva se na površini ili vrlo blizu površine i takva se vrsta odlaganja naziva plitko odlaganje, a čini ga sustav izrađenih prepreka koji pomaže izolaciji otpada od okoliša.

Pripovršinska odlagališta nuklearnog otpada ispod su razine tla, ali ne na velikoj dubini. Njihova izvedba uključuje zonu nedirnute stijene ili sedimenta iznad odlagališta koji fizički dijele odloženi otpad od površine i takav pristup znatno smanjuje rizik od nenamjernog upada ljudi.

Radioaktivni otpad s dugim vremenom poluraspada, kao i iskorišteno nuklearno gorivo, opasan je i nakon više tisuća godina, stoga je najsigurniji način zbrinjavanja duboko u čvrstim stijenskim masama uz poštivanje propisanih sigurnosnih mjera i pomoću bušotina velikog promjera.

## 2. Odlaganje radioaktivnog otpada u dubokim geološkim formacijama

Jedna od opcija zbrinjavanja otpada koji proizlazi iz proizvodne aktivnosti nuklearnih elektrana je odlaganje duboko u podzemlju. Otpad je moguće pohranjivati u duboka odlagališta te ga na taj način izolirati od okoline. Takvo se geološko odlaganje smatra najprikladnijim oblikom zbrinjavanja dugoživućeg radioaktivnog otpada te je za očekivati da će taj način odlaganja osigurati dovoljnu izolaciju radioaktivnog otpada iz okoline kroz stotine godina, odnosno sve dok ne nestane rizik koji taj otpad predstavlja za čovjeka i okoliš (Levanat, 1997.).

Sigurnost ovakvog načina odlaganja uvelike ovisi o geološkim karakteristikama geološke formacije za skladištenje radioaktivnog otpada kao i o sustavu višestrukih prepreka koje čine: stabilan oblik otpada, dugovječna ambalaža u kojoj je otpad pohranjen te trajnost ostalih izgrađenih struktura ili prirodnih prepreka karakterističnih za izabranu lokaciju odlagališta. Sve prepreke zajedno, promatrane kao sustav, dostatne su za zadržavanje i izolaciju otpada.

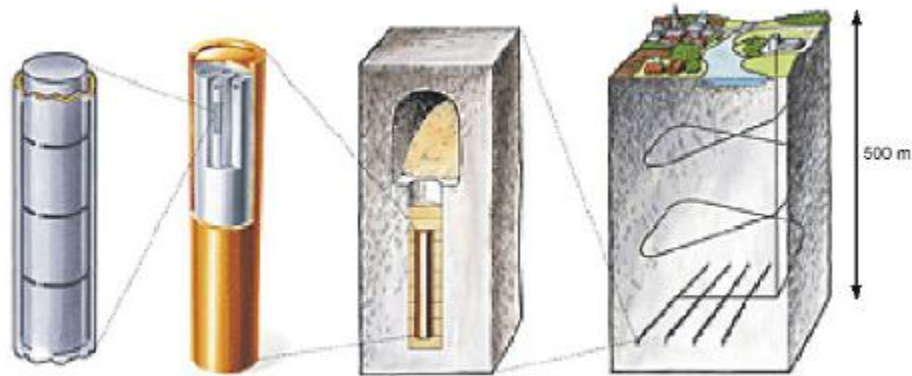
Kada se govori o geološkim formacijama pogodnim za skladištenje ove vrste otpada, govori se o sedimentnim, magmatskim i metamorfnim vrstama stijena niske propusnosti. Pored toga, istražuju se lokacije gdje nije isplativa eksploatacija prirodnih resursa (uključujući i geotermalne izvore) i lokacije bez podzemnih voda koje bi ugrožavale stabilnost spremnika s otpadom i oko njih izgrađenih prepreka te lokacije sa zanemarivom seizmičkom i magmatskom aktivnosti (Swift i dr, 2009.).

Radioaktivni otpad se odlaže u bušotine izbušene opremom namijenjenom za bušenje naftnih i plinskih bušotina ili za potrebe geoloških istraživanja, na dubini i do pet kilometara (Karl-Inge Åhäll, 2006.), a promjer bušotine je od oko 1.2 m i više (čak i do 15m). Promjer bušotine je važno pitanje, jer se kod bušotina većeg promjera može smjestiti veći spremnik s otpadom, a time i veća količina otpada.

Projekt i gradnja odlagališta radioaktivnog otpada mora osigurati sve mjere potrebne za sprečavanje radiološkog učinka otpada na stanovništvo i okoliš, uključujući posljedice mogućih ispuštanja. Odlagalište je kompleksna tehnološka jedinica koja uz bušotinu u koju odlažemo nuklearni otpad, sadrži i površinsko postrojenje sa cijelim nizom pogonskih, pomoćnih te zgrada za održavanje bez kojih bi djelovanje odlagališta pod

zemljom bilo nemoguće, a koje služe za primanje, sušenje i pakiranje radioaktivnog otpada u spremnike. Nadzemni dio odlagališta je kanalima i upadnim dijelom povezan s podzemnim dijelom. Podzemni dio odlagališta sastoji se iz dva dijela: tunela za opskrbu i dijela za odlaganje otpada.

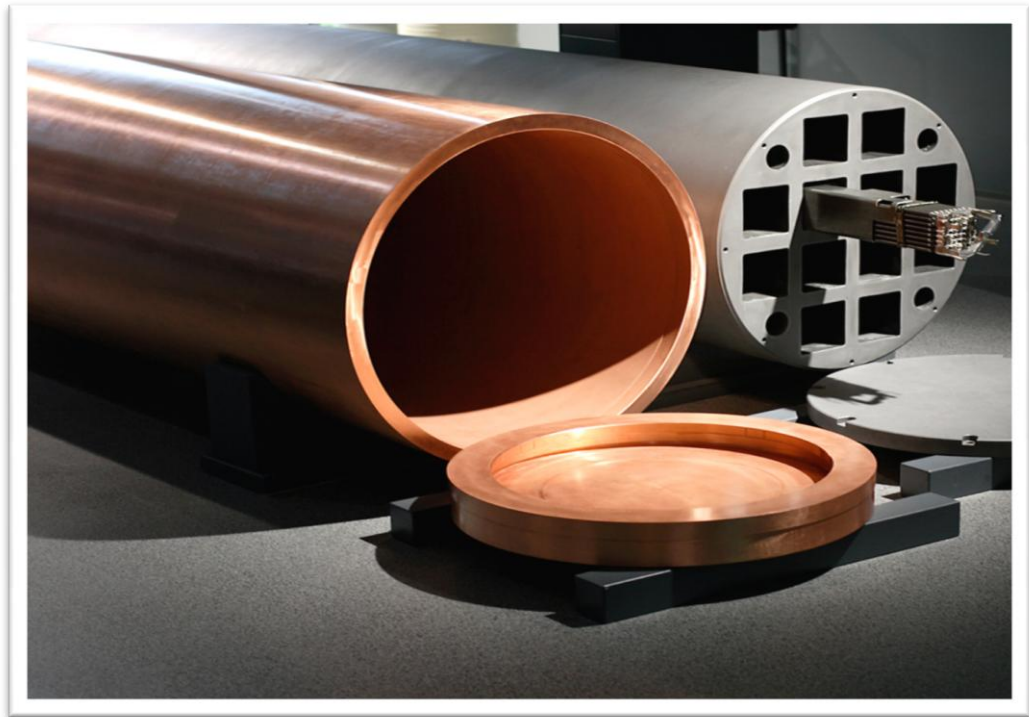
U podzemni dio se odlaže trajno zapakiran otpad, odnosno tzv. spremnici s otpadom, za koje je važno da su izrađeni od materijala otpornih na koroziju kako bi osigurali sigurno skladištenje radioaktivnog otpada kroz dugi niz godina. U tu svrhu koriste se spremnici izrađeni od bakra ili ugljičnog čelika (slika 2.1).



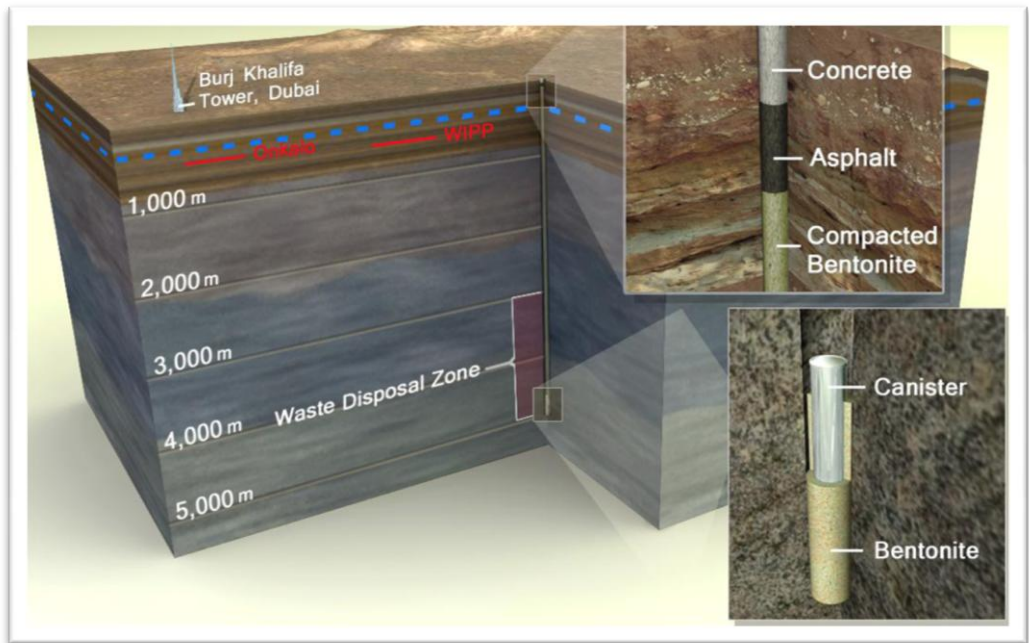
Slika 2.1. Odlaganje nuklearnog otpada: gorivo, tehnička barijera (spremnik), zapuna, tj. geotehnička barijera i geološka barijera (nepropusna stijena) AkEnd, (2002.)

Bakar je poznat po visokoj otpornosti na koroziju zbog stvaranja stabilnog oksidiranog filma na površini koji sprječava daljnju koroziju. Osim toga bakar je i termodinamički stabilan u anaerobnim uvjetima (Nolvi, 2009.). Prema opsežnim teoretskim i eksperimentalnim istraživanjima, u smislu korozije i erozije, ovakvi bi spremnici mogli izdržati stotine tisuća godina, čak i u najnepovoljnijim uvjetima.

Spremnik radioaktivnog otpada mora biti dovoljno velik, što je oko 1 m u promjeru i oko 5 m visine. Sastoji se od čelične unutrašnjosti i bakrenog vanjskog dijela, s poklopcem od čelika i još jednim od bakra (slika 2.2). Nakon što je spremnik napunjen otpadom, liftom se prevozi u unutrašnjost odlagališta, gdje se polaže u jedan od tunela prethodno ispunjen bentonitom. Bentonit služi kao granica između spremnika i okolne stijene. Kad je spremnik u tunelu, tunnel se zatvara bentonitnim čepom (slika 2.3).



Slika 2.2. Spremnik nuklearnog otpada izrađen od bakra i željeza ( Nolvi L. , 2009) .



Slika 2.3. Općeniti prikaz odlaganja radioaktivnog otpada u dubokim geološkim formacijama (Nolvi L., 2009)

Iako je nuklearni otpad pohranjen u spremnike, koji su planirani da izdrže i najekstremnije uvjete, moguće je širenje produkata odlagališta kroz sloj u kojem se pohranjuje otpad, te je stoga osnovni zadatak istraživanja odlagališta definirati da ne postoje putevi kroz koje bi fluidi mogli migrirati. Za takvu procjenu, potrebno je definirati geološki model pomoću bušotinske karotaže, te 3D i 4D seizmike, kao i petrofizikalne parametre za proračune i simulacije protoka unutar promatrane strukture. Za potvrdu proračuna ili korekciju ulaznih podataka za proračune protoka, koristi se još i ispitivanje promjena tlakova u bušotini.

### **3. Tehnike ispitivanja petrofizikalnih svojstava stijena u podzemnom skladištu nuklearnog otpada**

Uz stanovitu pažnju, analizi sigurnosti podzemnog skladišta nuklearnog otpada (ponajviše zbog vrste plina koji je mogući produkt odlagališta nuklearnog otpada i za koji je nešto drugačija relativna propusnost u stijeni te koji ima različitu interfacijalnu napetost i moćivost od prirodnog plina) moguće je pristupiti kao i kad se ispituje sigurnost podzemnog skladišta plina ili općenito kad se analizira protočna svojstva stijene.

Podzemno skladište nuklearnog otpada trebalo bi imati takvu propusnost da može zadržati sve produkte uskladištenog otpada dugi niz godina.

Kod iscrpljenih plinskih ležišta, zadržavanjem plina u nekom geološkom vremenu, in situ je potvrđeno da ležište može zadržati plinove sličnog kemijskog sastava i pri sličnim uvjetima tlaka. Pored iscrpljenih ležišta plina, za skladišta prirodnog plina razmatraju se i iscrpljena naftna ležišta te duboki akviferi. U svakom od navedenih slučajeva, poželjno je pronaći formacije koje će zadržati plin bez gubitaka na određeno vremensko razdoblje. Međutim, za navedenu svrhu, potrebno je skladištiti plin u hidrodinamički izolirano ležište, ali tako da je taj plin kasnije lako pridobiti natrag na površinu.

Stoga su predmet proučavanja stijena kao potencijalnih kandidata za odlaganje nuklearnog otpada izolatorske stijene, što zapravo može činiti procjenu i jednostavnijom jer nije potreban geološki model za veliko ležište, nego samo procjena stijena izolatora na nekoj manjoj lokaciji.

Za procjene protočnih svojstava stijena postoji više razina istraživanja. U fazi geofizičkih seizmičkih istraživanja lociraju se potencijalne povoljne formacije u kojima će se vršiti istraživanje. Zatim, izravniji tip mjerenja, koji daje manji broj podataka, jest bušotinska karotaža. Bušotinskom karotažom je moguće odrediti točne dubine i debljine različitih vrsta stijena zasićenih različitim fluidima (ugljikovodici, voda). Karotažom se za istraživanje nafte i vode određuju nepropusne zone lapora i glina te zone propusnih pješčenjaka. Jezgrovanjem se dobiva uzorak formacije na kojem se detaljno i izravno određuju petrofizikalna svojstva stijena.

Niskopropusni duboki slojevi gline predstavljaju najperspektivnije kandidate za odlaganje visokoradioaktivnog otpada (Van Geet, M. i dr., 2007., Huysmans M. i dr., 2006., Huysmans M. i Dassargues A., 2005., Landais, P., 2004.).

Volckaert G.L. i dr. (1997.) su definirali parametre kojima se mogu analitički izračunati krivulje relativnih propusnosti za plin u glinovitim stijenama, kao i parametre za korelaciju retencije vode u glinovitoj stijeni za sustav voda-plin.

Delahaye, C. i Alonso, E., (1998.) su metodama analize osjetljivosti na promjenu određenog parametra istraživali promjene koje se događaju s tlakom kao pokazateljem heterogenosti. Mjesta s većim tlakom plina pokazala su se kao područja gdje je manje rezultatno naprezanje na stijenu i posljedično veća poroznost i propusnost. Kod stijena veće heterogenosti veća je mogućnost za migraciju plina.

Graham, J. i dr., (2002.) su naveli četiri osnovna mehanizma prodora plina kroz glinovitu stijenu:

- dvofazni advektivni, tj. horizontalni protok u kojem je voda potisnuta plinom, uz djelovanje kapilarnih i gravitacijskih sila,
- difuzijom plina kroz mješivi fluid do najbližih praznina s manjom koncentracijom plina
- deformacijom strukture stijene, do proširenja pora na razinu kad je moguć protok plina
- frakturiranjem stijene kad efektivni tlak postane manji od stijenske čvrstoće na vlak

Za definiranje potrebnih parametara kojima se procjenjuje sigurnost skladišta, moguće je primijeniti postojeće metode koje se koriste za procjene proizvodnje nafte ili

vode, tj. metode koje se koriste za procjenu učinkovitosti utiskivanja plina, bilo za privremeno ili trajno skladištenje, bilo za metode utiskivanja radi dodatnog pridobivanja ugljikovodika. Zapravo, laboratorijska i bušotinska ispitivanja stijena za svrhe procjene nepropusnosti odlagališta nuklearnog otpada prezentirana u literaturi, zasnovana su na istim principima i tehnologiji kao i ispitivanja primijenjena u razradi ležišta ugljikovodika.

Među ta ispitivanja spadaju osnovne petrofizikalne analize:

- granulacije,
- poroznosti i
- apsolutne (plinske) propusnosti

Također ta ispitivanja uključuju i specijalne analize:

- mehaničkih svojstava stijena (stišljivost pora),
- relativne propusnosti i
- kapilarnih tlakova

Za ispitivanja porasta tlaka prilikom utiskivanja plina, u literaturi su najčešće prezentirani pilot projekti utiskivanja koji su načelno istovjetni ispitivanjima utisnih bušotina metodom pada tlaka (*fall-off* test).

### **3.1. Osnovne petrofizikalne analize**

Osnovnim petrofizikalnim analizama najizravnije se mogu odrediti svojstva stijene. Dvije su osnovne namjene laboratorijskih analiza: dobivanje najpreciznijih podataka na malenom uzorku stijene (valjčiću jezgre, najčešće promjera 3cm) te podaci za kalibraciju bušotinske karotaže. Bušotinskom karotažom se dobiva puno veći broj podataka koji tek nakon kvalitetne kalibracije daje dovoljno precizne podatke.

### *3.1.1. Analiza prirodne radioaktivnosti –utvrđivanje dubine geološke formacije litološkog sastava pogodnog za skladištenje nuklearnog otpada*

Mjerenjem prirodne radioaktivnosti na jezgrama stijene određuje se prije svega udio urana (ppm) i torija (ppm) te kalibrirana ukupna gustoća. Metode mjerenja prirodne radioaktivnosti u bušotinama su zasnovane na mjerenju intenziteta prirodnog gama zračenja. Takvo mjerenje, uz kalibraciju prema laboratorijskim podacima je jedno od potrebnih karotažnih mjerenja u svrhu razlikovanja različitih vrsti stijena (lapor, pješčenjak) zasićenim fluidima slične otpornosti (npr. vodom sličnih saliniteta).

Bušotinska karotaža koja se temelji na ispitivanju zračenja geoloških formacija pomoću gama zračenja spada u najstarija karotažna mjerenja u naftnom inženjerstvu (Schweitzer, 1991). Gama karotaža potvrđena je kao najosnovnija geofizička metoda određivanja sedimentnih formacija (Howell i Frosch, 1939; Lock i Hoyer, 1971; Serra, i dr.,1980; Wahl, 1983). Prirodno gama zračenje rezultat je radioaktivnog raspada izotopa  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  i  $^{232}\text{Th}$  te njihovih nusprodukata koji se javljaju u stijeni. Različitosti u koncentraciji navedenih radioaktivnih izotopa pokazatelj su različitosti u mineralnom sastavu stijene. Tako će glinoviti segmenti stijene sadržavati povećanu koncentraciju torija, dok je povećana koncentracija urana povezana sa djelovanjem podzemne vode i prisustvom stijena koje potencijalno sadrže ugljikovodike. Spektralna gama karotaža mjeri sadržaj navedenih izotopa u bušotini. U literaturi je potvrđeno kako je spektralna gama karotaža pogodna za utvrđivanje tankih proslojaka različitih sedimenata (Worthington i dr.,1990).

U laboratoriju, mjerni uređaj detektira gama zrake pomoću natrij jodidnog scintilacijskog kristala, pretvarajući zračenje u svjetlosni snop. Svjetlosni snop se prevodi u neku drugu vrstu signala (npr. električni signal). Kako su poznate dubine iz kojih je jezgrovan uzorak stijene, iz podataka dobivenih u laboratoriju se računaju koeficijenti za korelaciju s podacima dobivenih bušotinskom karotažom, kako bi se korigirali rezultati bušotinske karotaže koji mogu biti manje točni zbog nepravilnosti kanala bušotine, oštećenja isplakom, frakturama i sl. Također, pomoću laboratorijskih podataka gama zračenja određuje se korekcija kako bi se odredila točna dubina na kojoj su se prihvatili podaci.



### 3.1.2. Mjerenje poroznosti

Kod određivanja poroznosti stijene, bitno je znati bar dva od navedenih parametara (Goričnik, 1976.):

- Ukupni (vanjski) volumen,  $V_b$ ,
- Volumen zrna (kruta matrica),  $V_s$  i
- Volumen pora,  $V_p$

Ukupni volumen može se odrediti (Goričnik, 1976.):

- Računanjem volumena iz dimenzija jezgre obrađene u pravilni geometrijski oblik (valjak),
- Volumetrijskom metodom, uranjanjem u živu (najprikladnija metoda za uzorke jezgre nepravilnog oblika, krhotine) i
- Gravimetrijskom metodom, vaganjem jezgre, zasićene fluidom prije i poslije uranjanja u taj isti fluid.

Za određivanje volumena zrna koriste se dvije metode (Goričnik, 1976.):

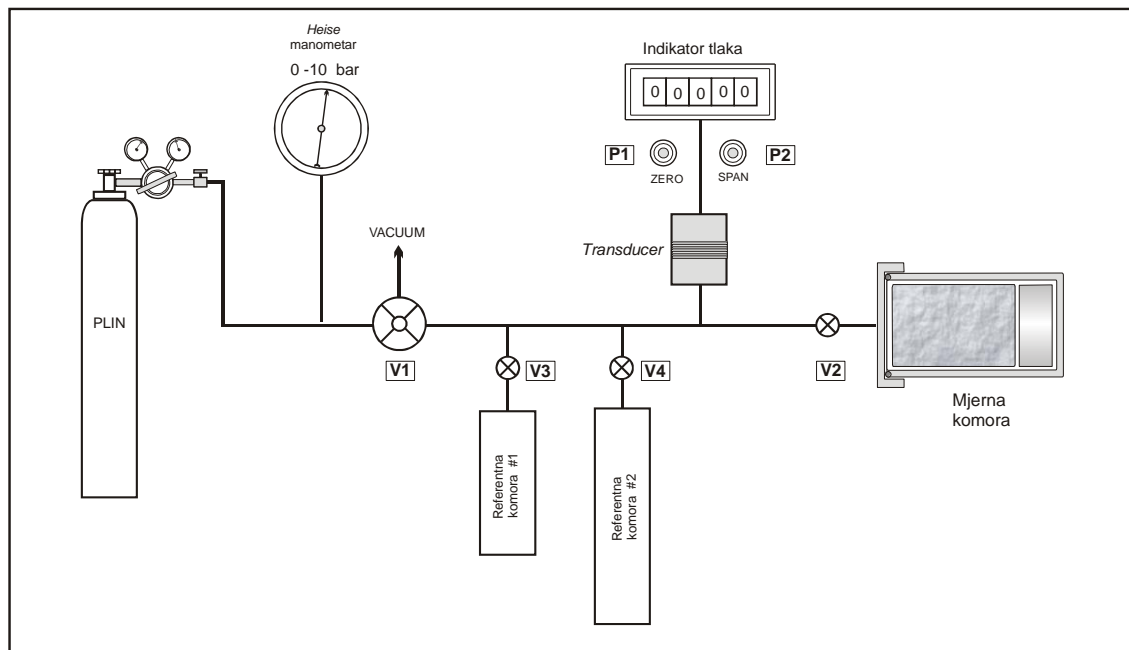
- Metoda određivanja gustoće usitnjene stijene piknometrom (apsolutna poroznost)
- Helijska porozimetrija, tj. određivanje volumena zrna primjenom Boyleovog zakona

Volumen pora može se izmjeriti:

- Volumetrijskom metodom, utiskivanjem žive u pore uzorka ili mjerenjem izlaznog fluida prilikom desaturacije jezgre
- Gravimetrijskom metodom, tj. vaganjem suhe jezgre te nakon toga jezgre zasićene fluidom poznate gustoće.

Najčešća metoda određivanja poroznosti jest Helijska porozimetrija (slika 3.1.). Princip određivanja sastoji se u tome da se jezgra stavi u mjernu komoru porozimetra, volumena  $V_{mk}$ , pri atmosferskom tlaku ili vakuumu ( $p_2$ ). Kada je ventil između komora zatvoren, tlak plina u referentnoj komori poveća se na  $p_1$ . Ventil između dvije komore se

tada otvori pri čemu plin ekspandira iz  $V_{ref}$  u  $V_{mk}$  sve dok se tlak u obje komore ne izjednači na vrijednost  $p_e$ , pri čemu je  $p_1 > p_e > p_2$ .



Slika 3.1. Shematski prikaz uređaja za mjerenje poroznosti. V1 je trosmjerni ventil - ovisno o položaju, tok plina u sustav je dozvoljen, prekinut, odnosno, sustav je otvoren prema vakuum pumpi ili atmosferi. Pod sustavom podrazumijevaju se sve komore i tlačne cijevi (tj. njihov volumen) od V1 nadalje. Ventili V2, V3 i V4 služe prekidu protoka plina (Vulin, 2012) .

Kako je efektivni volumen mjerne ćelije jednak volumenu same ćelije, umanjenom za volumen krute matrice analiziranog uzorka porozne stijene (pri ekspanziji plin prodire u pore uzorka, ali ne i u minerale stijene), nakon ekspanzije vrijedi:

$$p_e (V_{ref} + V_{mk} - V_s) = p_1 V_{ref} + p_2 (V_{mk} - V_s) \quad (3.1.)$$

$p_1$  - tlak na početku protočnog segmenta, bar

$p_2$  - tlak na kraju protočnog segmenta, bar

$p_e$  - tlak ekspanzije u porozimetru, bar

$V_{mk}$  - volumen mjerne komore porozimetra,  $\text{cm}^3$

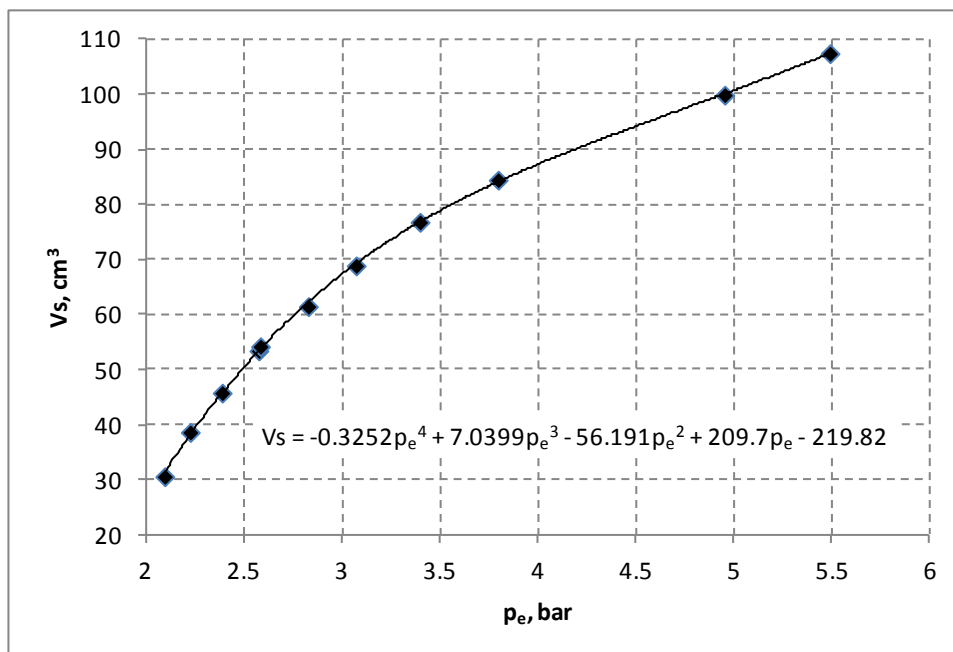
$V_{ref}$  - volumen referentne komore porozimetra,  $\text{cm}^3$

$V_s$  - Volumen zrna uzorka,  $\text{cm}^3$

Sređivanjem jednadžbe (3.1.) dobije se da je volumen zrna analiziranog uzorka jednak:

$$V_s = \frac{V_{ref}(p_e - p_1) + V_{mk}(p_e - p_2)}{(p_e - p_2)} \quad (3.2.)$$

U praksi, radi izbjegavanja pogreške koja nastaje zbog nepoznatog volumena vodova u uređaju, tj. između komora, opisana mjerenja se izvode tako da se rabi uvijek isti početni tlak plina u referentnoj i mjernej komori. Konstantnim početnim tlakom i volumenom određena je uvijek ista količina plina u sustavu. Efektivni volumen mjerne ćelije, odnosno konačni volumen sustava kao i tlak nakon ekspanzije,  $p_e$ , ovise o poroznosti analiziranog uzorka,  $V_s$ . Koristeći metalne kalibracijske valjčiče poznatog volumena, mjerenjem se određuje  $V_s - p_e$  dijagram (slika 3.2.) ili analitička korelacija (najčešće polinom četvrtog stupnja). Iz kalibracijskog dijagrama se dalje, na temelju izmjerenog  $p_e$  izravno očita  $V_s$  ispitivanog uzorka stijene.



Slika 3.2. Kalibracijska krivulje za izravno određivanje  $V_s$  (Vulin, 2012.)

### 3.1.3. Mjerenje plinske (apsolutne) propusnosti

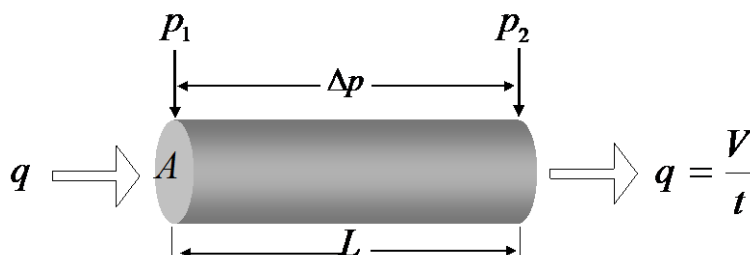
Mjerenje propusnosti osnovano je na Darcyevom zakonu za raspon tlakova u kojima se može zanemariti efekt stišljivosti plina (Goričnik, 1976.) :

$$q = -k \frac{1}{\mu} \frac{A}{L} (p_2 - p_1) \quad (3.3)$$

Tijekom protjecanja plina ili tekućine poznate viskoznosti kroz jezgru poznatih dimenzija, mjeri se volumen fluida u jedinici vremena te pripadni tlačni gradijent. Ovi eksperimentalni podaci, uvršteni u Darcyjevu jednadžbu za protok fluida omogućuju računanje apsolutne propusnosti prema

$$k = \frac{V}{t} \frac{L}{A} \mu \Delta p \quad (3.4)$$

koja vrijedi kada se pri mjerenju rabi tekućina.



Slika 3.3. Model linearnog protoka kroz jezgru stijene

Kada se propusnost mjeri protokom plina, zbog kompresibilnosti plina, protok na ulazu u jezgru nije jednak protoku na izlazu iz jezgre,  $q_1 < q_2$ . Budući da pri konstantnoj temperaturi eksperimenta vrijedi  $p_1 q_1 = p_2 q_2 = \bar{p} \bar{q}$ , propusnost se računa uz srednji protok :

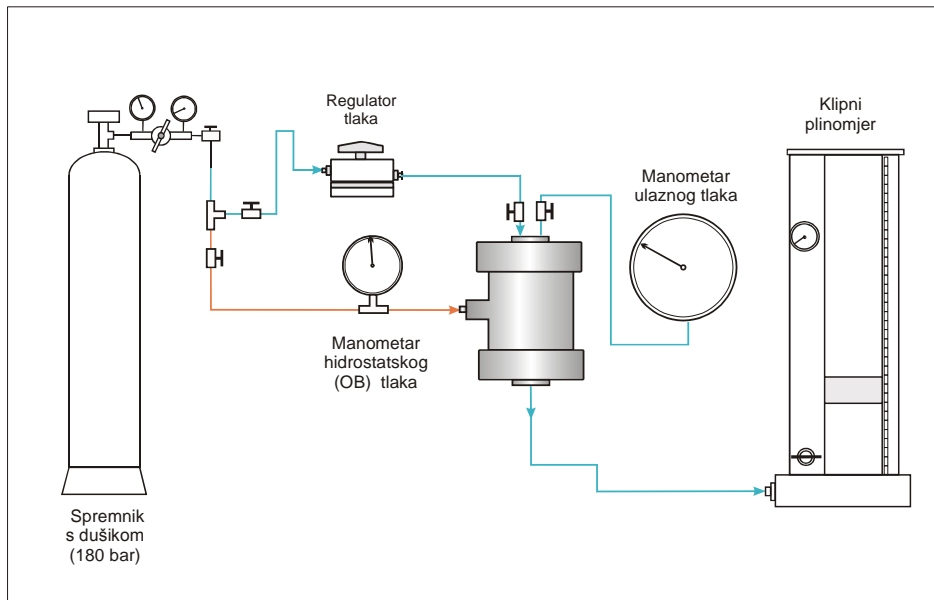
$$\bar{p} = \frac{(p_1 + p_2)}{2} \quad (3.5)$$

$$\bar{q} = \frac{(p_2 q_2)}{\bar{p}} \quad (3.6)$$

tako da je

$$k = \frac{\bar{q} L}{A(p_1 - p_2)} \mu \quad (3.7)$$

Uređaj za mjerenje plinske propusnosti (slika 3.4) se sastoji od boce s dušikom pod visokim tlakom, manometara za mjerenje simuliranog petrostatskog tlaka te ulaznog i izlaznog tlaka plina koji protiče, regulatora tlaka koji služi za kontrolu konstantnog ulaznog tlaka plina, hidrostatskog držača jezgre, klipnog plinskog volumetra te električnog zapornog sata za mjerenje vremena promjene volumena plina koji protječe do plinskog volumetra.



Slika 3.4. Shema uređaja za mjerenje propusnosti protokom plina. Dušik iz boce je izvor tlakova koji simuliraju petrostatski i porni tlak. Iako se na jezgri primjenjuje tlak cca 10 bar (bitno manji od petrostatskog), svrha je simulirati utjecaj ležišnog *efektivnog tlaka* koji je razlika pornog i petrostatskog (Vulin, 2012.).

Za mjerenje plinske propusnosti najčešće se koristi Hasslerov tip držača. Takav držač ima u sebi elastični gumeni rukavac koji osigurava dobro brtvljenje posude u kojoj se nalazi plin. Petrostatski (*engl. overburden, confining pressure*) tlak između držača i gume dodatno pomaže brtvljenju uz gornji i donji poklopac. Za utiskivanje tekućine, koristi se

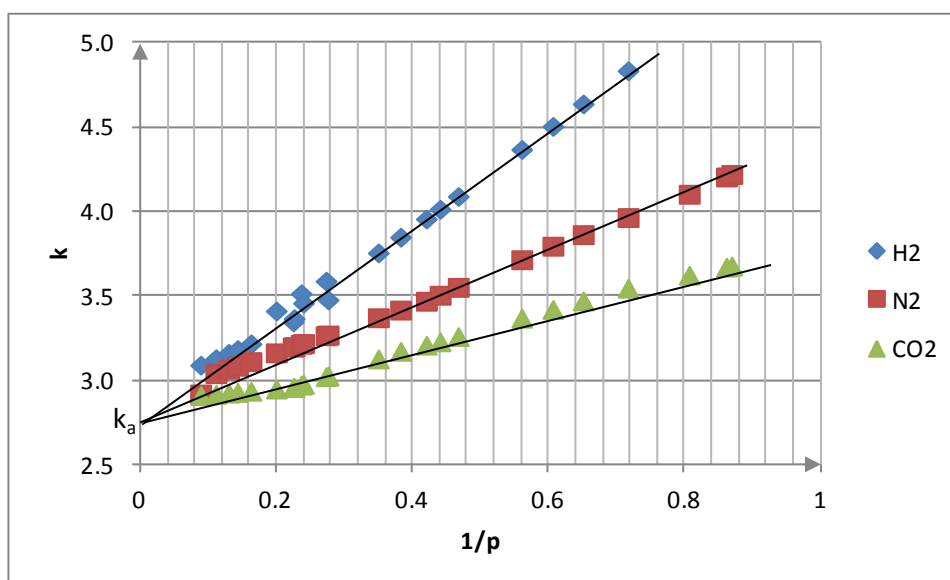
drugačiji tip držača s krutijim gumenim rukavcem, jer nije potrebna ovakva izvedba brtvljenja.

Pri malom tlaku manje je trenje među molekulama plina, koje proklizavaju uz stijenke kapilara te je mjereni protok plina kroz jezgru veći nego što bi bio protok tekućine uz isti tlačni gradijent. Mjerene propusnosti za plin su to veće od prave apsolutne propusnosti uzorka što je tlak mjerenja niži (Goričnik, 1976.) .

Mjerenje apsolutne propusnosti protokom plina, dakle, ovisi o ulaznom tlaku. Stoga se takvo mjerenje mora korigirati za proklizavanje plina do kojeg dolazi pri nižim tlakovima. U principu, mjerenje se zbog tehničke izvedbe uređaja izvodi pri malom ulaznom tlaku, ali bi bilo preciznije pri jako visokim tlakovima.

Klinkenberg (1941.) je ispitivanjem propusnosti za nekoliko plinova pri različitim tlakovima pokazao kako se ekstrapolirani korelacijski pravci sijeku u točki  $1/p$  (beskonačan tlak protjecanja). Ta točka predstavlja apsolutni koeficijent propusnosti.

Stoga se radi korekcija za Klinkenbergov efekt (slika 3.5) tako da se na x os nanosi  $1/(\text{ulazni tlak})$ , a na y os se unose preračunati koeficijenti propusnosti. Ekstrapolacijom osrednjenog korelacijskog pravca, koji najbolje korelira nekoliko mjerenja na istom uzorku, ali s različitim ulaznim tlakovima, do sjecišta s osi y dobiva se korigirana apsolutna propusnost.



Slika 3.5. Korekcija za Klinkenbergov efekt (prema eksperimentalnim podacima iz Klinkenberg, 1941. (Vulin, 2012.).

## 3.2. Specijalne petrofizikalne analize

### 3.2.1. Mjerenje stlačivosti pora

U laboratoriju se vanjski, petrofizički tlak (tlak naslaga) simulira hidrostatskim tlakom na uzorak stijene (jezgra). Početni uvjeti opterećenja uzorka stijene uspostavljaju se tehnikom postepenog povećanja vanjskog i unutarnjeg tlaka u koracima uz održavanje gradijenta 15-20 bar i uspostavljeni su kada je uzorak opterećen izvana tlakom od oko 700 bar uz otprilike 10 bara manji porni tlak.

Mjerenje promjena volumena pora postiže se stupnjevitim smanjenjem količine fluida u porama (slana voda) pomoću mikro-volumetrijske pumpe, uz održavanje konstantnog vanjskog tlaka od 690 bar tijekom mjerenja. Na skali mikropumpe očitava se prirast volumena, a na skali manometra odgovarajuća promjena (smanjenje) pornog tlaka. Budući da se vanjski tlak održava konstantnim, svakom koraku ekspanzije volumena pornog fluida pripada odgovarajuće smanjenje pornog volumena zbog promjene (porasta) efektivnog tlaka.

Konačni i najvažniji rezultat laboratorijskih mjerenja je krivulja ovisnosti pornog volumena o efektivnom tlaku iz koje se računaju krivulje ovisnosti koeficijenta stlačivosti pora o efektivnom tlaku prema (Goričnik, 1976.) :

$$c_p \approx -\frac{1}{V_p} \left( \frac{\Delta V_p}{\Delta p_{ef}} \right)_{\bar{\sigma}} \quad (3.8)$$

Koeficijent stlačivosti jednak je derivaciji, tj. koeficijentu nagiba krivulje u pojedinoj eksperimentalnoj točki, podijeljeno s vrijednošću pripadnog pornog volumena u toj točki.

Ovako definiran  $c_p$  zove se koeficijent stlačivosti pora u točki (*engl. instantaneous pore compressibility coefficient*).

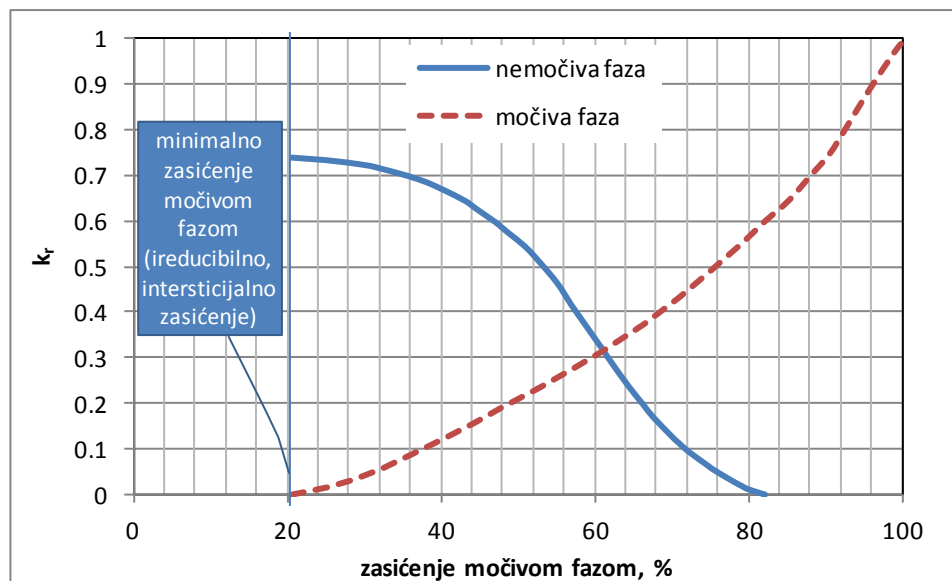
Veličina deformacija pornog prostora stijena općenito ovisi o (Goričnik, 1976.):

- litološkim karakteristikama, tj. mineralnom, odnosno kemijskom sastavu stijena, npr. stlačivost pješčenjaka iznosi 4 do  $6 \cdot 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$ , a vapnenaca od 20 do  $25 \cdot 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$  i
- poroznosti stijena: što je manja poroznost, veća je stlačivost stijena.

### 3.2.2. Određivanje relativnih propusnosti

Relativna propusnost je omjer efektivne propusnosti jednog fluida u slučaju zasićenja s više vrsta fluida (npr. nafta i voda) i neke referentne propusnosti (najčešće Klinkenbergove apsolutne propusnosti):

$$k_{ro} = \frac{k_o}{k}, \quad k_{rw} = \frac{k_w}{k}, \quad k_{rg} = \frac{k_g}{k} \quad (3.9)$$



Slika 3.6. Prikaz odnosa zasićenja i relativnih propusnosti za močivu i nemočivu fazu (Goričnik, 1976.)

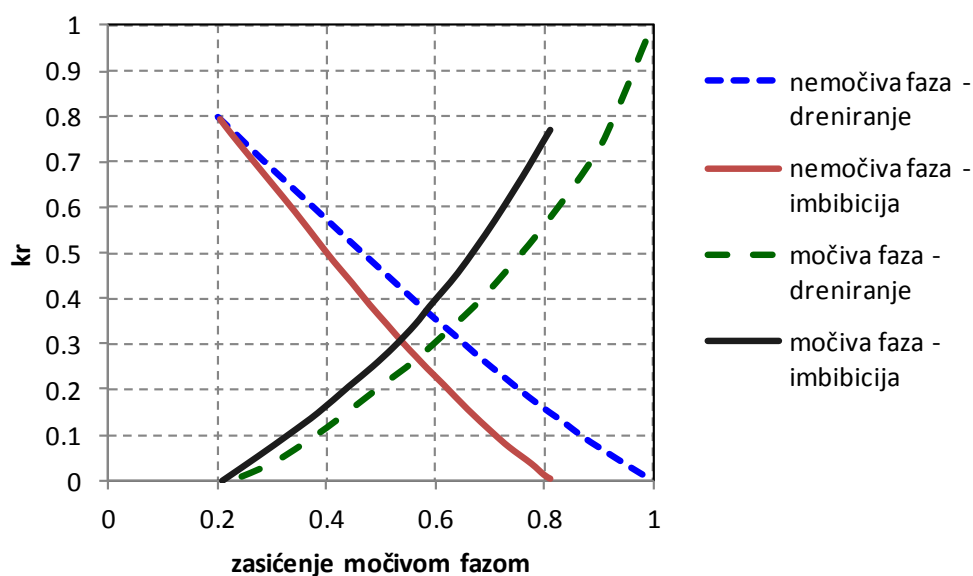
Obzirom na međusoban odnos krivulja relativnih propusnosti (slika 3.6) za močivu (najčešće slojna voda) i nemočivu fazu (ugljikovodični fluidi, plinovi) može se razlikovati nekoliko područja. Relativna propusnost močive faze može biti  $k_r=1$  samo pri 100%-tnom zasićenju močivom fazom. Relativna propusnost močive faze brže pada smanjenjem njenog zasićenja, nego što pada relativna propusnost za nemočivu fazu, tj. smanjenjem



zasićenja nemoćive faze. Relativna propusnost moćive faze je  $k_r=0$  pri tzv. ireducibilnom zasićenju moćivom fazom. Točka zasićenja u kojoj je relativna propusnost nemoćive faze  $k_r=0$  zove se uravnoteženo zasićenje (*engl. equilibrium saturation*) (Goričnik, 1976.) .

Ovisno o smjeru zasićivanja, postoje dva tipa krivulja relativnih propusnosti (slika 3.7):

- tzv. krivulja dreniranja (*engl. drainage curve*), čije smanjenje ukazuje na nadomještanje, odn. istiskivanje moćive faze nemoćivom (u laboratoriju to je ekvivalentno npr. mjerenju saturacije živom, tj. Purcellovoj metodi)
- tzv. krivulja imbibicije, kada se povećava zasićenje moćivom fazom, nemoćivu fazu se istiskuje moćivom



Slika 3.7. Odnos relativnih propusnosti, ovisno o smjeru zasićivanja (imbibicija, dreniranja) (Goričnik, 1976.)

Poznavanje relativnih propusnosti je ključno za proračun višefaznog protoka. Teorijske jednadžbe i proračun frontalnog istiskivanja, temeljen najčešće na krivulji relativnih propusnosti određenoj mjerenjima u laboratoriju (Leverett, 1941, Buckley i Leverett, 1942) daju najkonzistentnije, ali poopćene podatke o dvofaznom protjecanju, promatranom u 2 dimenzije. Utiskivanjem fluida u jezgru u laboratoriju, krivulje relativnih propusnosti se računaju najčešće prema metodi Welgea (1949., 1952.) koja u principu predstavlja proračun u obrnutom smjeru od metode Buckleya i Leveretta.

U radovima Pirsona (1958), Scheideggera (1960) i Amyksa i dr. (1960) opisani su postupci dobivanja krivulja relativnih propusnosti u laboratoriju.

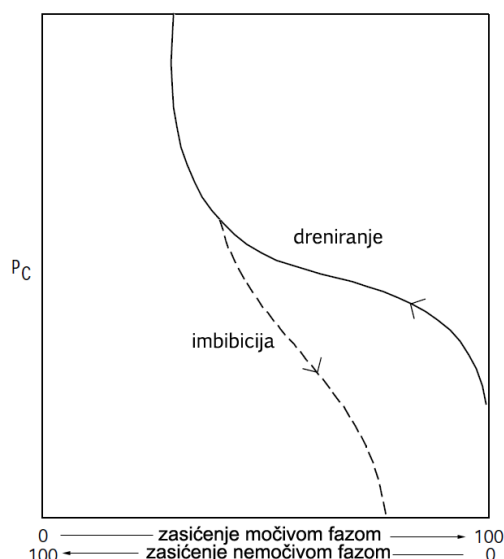
Relativna propusnost se određuje (Goričnik, 1976.) :

- metodom ustaljenog protoka u laboratoriju (*engl. steady state test*),
- metodom istiskivanja fluida iz jezgre (*engl. unsteady state*) – protok utiskivajućeg i istiskivajućeg fluida se mijenja,
- preračunavanjem iz krivulje kapilarnog tlaka i
- preračunavanjem iz podataka o proizvodnji

Većina podataka relativnih propusnosti se mjeri u laboratoriju *unsteady state* metodom, jer je brza, tehnički jednostavna i može se raditi na malim uzorcima (Goričnik, 1976). Osnovna tehnika mjerenja je pomoću jezgre u hidrostatskom držaču (npr. *Hasslerovog* tipa, slično kao i kod mjerenja apsolutne propusnosti) i sastoji se u tome da se u jezgru zasićenu močivim fluidom (za slučaj skladišta nuklearnog otpada bi se koristila voda, za propusnosti u ležištu ugljikovodika se koristi ulje ili nafta) utiskuje nemočivi fluid (plin) pod kontroliranim tlakom te se mjere volumeni proizvedenih fluida u jedinici vremena. Iz mjerenih podataka mogu se izračunati jedino omjeri relativnih propusnosti (npr.  $k_{rg}/k_{rw}$ ).

### 3.2.3. Mjerenje kapilarnih tlakova u stijeni

Mjerenje kapilarnih svojstava stijene može služiti procjeni niza karakteristika ležišta. Iz osnovnih jednadžbi, statističkom obradom krivulje kapilarnog tlaka, moguće je odrediti raspodjelu različitih radijusa pornih kanala. Također, moguće je procijeniti podizanje močivog i težeg fluida u više strukture zbog kapilarnih sila. Ovakav podatak bi mogao poslužiti i procjenama migracije plinova u skladištu nuklearnog otpada, samo zbog utjecaja kapilarnih sila. Iz izmjerene krivulje kapilarnog tlaka također je moguće izračunati relativne propusnosti. Krivulje relativnih propusnosti i kapilarnog tlaka pokazuju histerezu (slika 3.8), tj. različite su u slučaju kada nemočivi fluid istiskuje močivi (dreniranje) od slučaja kad močivi fluid istiskuje nemočivi (imbibicija).



Slika 3.8. Krivulja kapilarnog tlaka (Goričnik, 1976.)

Eksperimentalne metode određivanja kapilarnog tlaka su (Goričnik, 1976.) :

- a) Metoda desaturacije uzorka stijene (*engl. restored state method*)
  - tehnikom polupropusne membrane (dijafragme) i
  - tehnikom centrifugiranja
  
- b) Metoda saturacije uzorka stijene utiskivanjem žive (Hg, Purcellova metoda)

Iako se metodom saturacije koristi fluid koji nije srodan fluidima u ležištu (živa), metoda je široko korištena zbog višestruko manjeg vremena analize (nekoliko minuta, dok npr. za desaturaciju metodom polupropusne membrane treba i više od mjesec dana).

Određivanje relativnih propusnosti iz krivulja kapilarnog tlaka pogodno je za stijene vrlo niske propusnosti (kada je teško izvedivo ili neizvedivo protiskivanje fluida da bi se mogao mjeriti protok).

Relativne propusnosti se mogu dobiti analitički ukoliko je poznata krivulja kapilarnog tlaka za raspon od ireducibilnog zasićenja  $S_{irr}$  do 100% zasićenja močivim fluidom. Prema Purcellovoj jednadžbi (1949), propusnost se može izraziti propusnost pomoću kapilarnog tlaka:

$$k = \frac{(\sigma \cos \theta)^2}{2} \phi \lambda \int_0^1 \frac{dS}{P_c^2} \quad (3.10)$$

Efektivna propusnost je jednaka:

$$k_{wt} = \frac{(\sigma \cos \theta)^2}{2} \phi \lambda \int_0^{S_w} \frac{dS}{P_c^2} \quad (3.11)$$

I relativna propusnost za močivu fazu je tada:

$$k_{rwt} = \frac{k_{wt}}{k} = \frac{\int_0^{S_w} \frac{dS}{P_c^2}}{\int_0^1 \frac{dS}{P_c^2}} \quad (3.12)$$

Analogno se može pisati za nemočivu fazu:

$$k_{rmt} = \frac{k_{mwt}}{k} = \frac{\int_{S_w}^1 \frac{dS}{P_c^2}}{\int_0^1 \frac{dS}{P_c^2}} \quad (3.13)$$

Delahaye, C. i Alonso, E., (1999) su dali izraze za računanje relativnih propusnosti u glinama povoljnim za skladište nuklearnog otpada, ovisno zasićenju temeljeno na analizi osjetljivosti parametara močivosti eksperimentalnih podataka. Jednadžba je definirana funkcijom potencije zasićenja plinom ( $1 - S_w$ ):

$$k_{rg} = a(1 - S_w)^b$$

$k_{rg}$  – relativna propusnost za plin

a, b – koeficijenti korelacije, bez fizikalnog značenja

$S_w$  – zasićenje vodom, dij. jed. (pretpostavka je da je zasićenje plinom tada =  $1 - S_w$ )

### 3.3. Ispitivanja metodom pada tlaka

Za spremnik nuklearnog otpada, metodom pada tlaka radi se hidrodinamički test podzemnog skladišta. Različitost od hidrodinamičkog *fall-off* testa za potrebe eksploatacije ležišta ugljikovodika ili geotermalnog ležišta jest u tome da se često test radi na dodatnoj inkliniranoj bušotini u koju se utiskuje voda i/ili plin kako bi se odredili slijedeći parametri (Jockwer, 2006):

- Protok plina u nezasićenoj izolacijskoj stijeni pri različitim tlakovima plina
- Protok plina u susjedne stijene pri različitim tlakovima
- Zasićenje vodom (brzina promjene i ukupno)
- Protok vode u susjednoj stijeni pri različitim tlakovima
- Protok vode kroz zasićenu izolacijsku stijenu pri različitim tlakovima
- Tlak proboja plina i
- Parcijalni protok plina u različitim koracima tlaka utiskivanja sve do statičkog (pornog, ležišnog) tlaka

Podaci takvog mjerenja koriste se za modeliranje sljedećih parametara (Jockwer, 2006):

- Propusnosti za plin u izolatorskoj stijeni
- Propusnosti za vodu u izolatorskoj stijeni
- Dvofaznog protoka u izolacijskoj stijeni i
- Propusnosti za plin i vodu u okolnim stijenama skladišta.

Najjednostavniji pristup ispitivanju promjene tlakova u bušotinama je povezan s teorijskim jednadžbama difuziviteta za konstantni proto uz pad tlaka (pri zanemarivom djelovanju tlaka iz neograničenog akvifera). Pri tome granični uvjeti u ležištu definiraju i rješenje problema.

Za potrebe testiranja naftnih ili plinskih bušotina, nakon što je izbušen interval, izvode se inicijalni testovi iz kojih se doznaju parametri poput indeksa proizvodnosti, oštećenja pribušotinske zone isplakom za bušenje tzv. skin efekt,  $S$ , statički tlak, drenažni radijus i efektivna propusnost intervala. U slučaju skladištenja nuklearnog otpada, poželjno je da pribušotinska zona služi kao zona u kojoj će se raspodijeliti tlak eventualno nastalih plinova u odlagalištu, dok sami sloj treba biti toliko nepropusan da plinovi ne migriraju daleko od samog odlagališta. Stoga se za odlagalište nuklearnog otpada eventualno mogu primijeniti testovi koji se koriste za utisne bušotine iako treba uzeti u obzir da se sam problem dosta razlikuje od slučaja utiskivanja vode ili plina za pridobivanje dodatnog iscrpka nafte ili plina u nekoj udaljenoj proizvodnoj bušotini.

Utisne bušotine se testiraju kako bi se odredio indeks injektivnosti,  $I_m = Q_m / (p_{in} - \bar{p})$  ( $\text{bar}^{-1} \text{m}^3/\text{s}$ ), propusnost produktivnog intervala ( $kh$ ) i skin. Testiranje je obrnuto od inicijalnog testa s porastom tlaka, tj. sastoji se od perioda stabilizacije (bušotina se zatvori te se mjeri tlak i temperatura na dnu bušotine), zatim utiskivanja pri konstantnom protoku pri čemu se bilježi tlak na dnu ( $p_{wf}$ ) i na ušću ( $p_{tf}$ ) bušotine. Posljednji dio ispitivanja se sastoji u prestanku utiskivanja i tzv. *fall-off* periodu pada tlaka u kojem se mjere temperatura i tlak na dnu ( $p_{ws}$ ) i ušću ( $p_{ts}$ ) bušotine (Goričnik, 1976.) .

Propusnost proizvodnog intervala ( $hk$ ) te oštećenje pribušotinske zone ( $S$ ) izračunavaju se iz pada tlaka nakon prestanka utiskivanja, po istom principu kako se računa za porast tlaka iz testa u proizvodnoj bušotini.

Srednji tlak zone utiskivanja, za slučaj utiskivanja vode u sloj zasićen također vodom se može računati izravno ekstrapolacijom tlaka u bušotini ( $p_i$ ) kad  $\Delta t$  teži u beskonačnost, tj. kada se  $\Delta t / (t_p + \Delta t)$  približava jedinici (slika 3.9).

Mjereni podaci o tlaku, protoku i vremenu se često preračunavaju u takav oblik da bi se mogle koristiti tipske krivulje temeljene na bezdimenzionalnim parametrima. Tipske krivulje se koriste za interpretaciju testiranja bušotina i konstantno se unapređuju. Jednadžbe koje se primjenjuju uz tipske krivulje obuhvaćaju većinu slučajeva koji se mogu predvidjeti u ležištu, pa je moguće detektirati protok kroz frakture, granice protočne sredine, nepropusne barijere poput rasjeda, itd. Interpretacija na takav način uključuje ucrtavanje mjerenih i preračunatih podataka u log-log dijagram kako bi se preklapanjem s tipskim krivuljama odredilo propusnost i skin efekt. Također, pomoću takve analize može se detektirati i protok kroz frakture (prema nagibu linearnog dijela krivulje porasta tlaka). Ukoliko je mjerenje precizno, iste parametre moguće je većom točnošću odrediti iz derivacije tipske krivulje (također dostupne uz svaki set tipskih krivulja).

Na primjeru su (slika 3.9.) uspoređene tri krivulje:

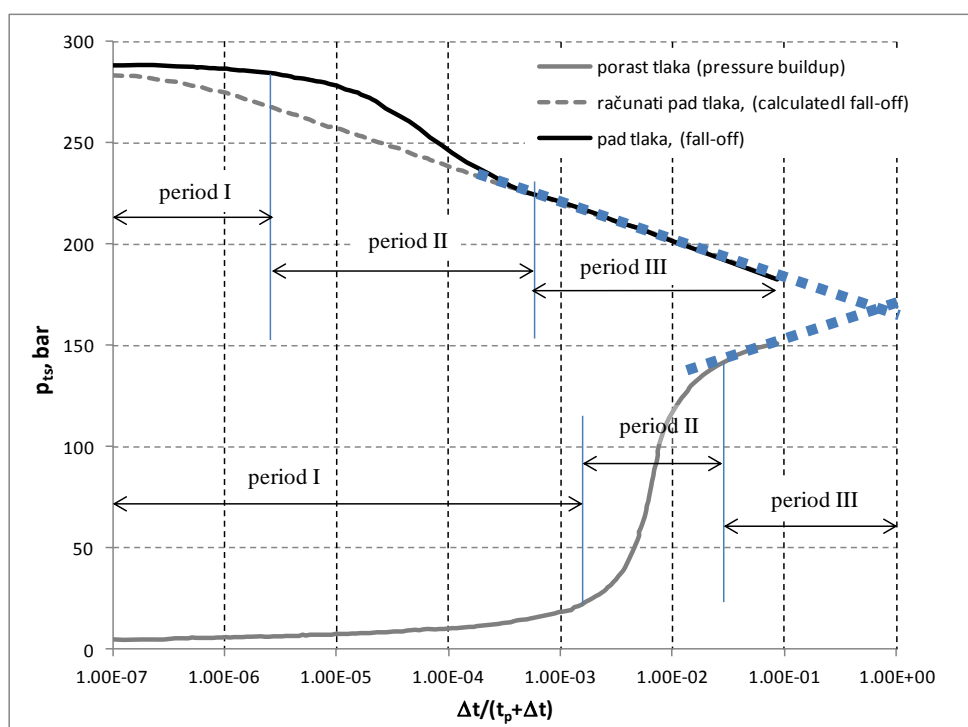
- 1) krivulja iz testa porasta tlaka
- 2) krivulja iz testa pada tlaka
- 3) računati teoretski pad tlaka

Bušotina je 2 mjeseca funkcionirala kao proizvodna, proizvodeći samo vodu. Nakon toga se počelo utiskivati. Krivulje se mogu podijeliti u tri područja (perioda):

I - prvih nekoliko sekundi nakon zatvaranja nakon vremena utiskivanja  $t_p$  - to je područje koje je teško analitički opisivo

II - nekoliko sati ( $\Delta t$ ) nakon zatvaranja, područje koje pokazuje karakteristike pribušotinske zone i skin efekt

III - kasni period nakon zatvaranja, koji pokazuje efekte nastale zbog uvjeta u ležištu i primarno služi određivanju statičkog tlaka u ležištu i injektivnosti.



Slika 3.9. Rezultati mjerenja testovima porasta i pada tlaka (Goričnik, 1976.)

Prosječni statički tlak, za neograničeni tip ležišta određuje se ekstrapolacijom krivulje do nekog beskonačnog vremena  $\Delta t$  nakon zatvaranja, te se na dotičnom primjeru može uočiti analogija testova porasta i pada tlaka (slika 3.9., ekstrapolirani statički tlak je oko 165 bar). Produktivnost ili injektivnost se pak može odrediti računanjem nagiba ( $m$ )

linearnog dijela krivulje  $\log(\Delta t / (t_p + \Delta t)) - p$  u području III. Mjerna jedinica nagiba je  $\text{bar}/\log(\text{ciklus})$  i za *fall-off* test se uzima pozitivna vrijednost.

Pomoću nagiba moguće je izračunati umnožak debljine proizvodnog/utisnog intervala i propusnosti i on se razlikuje za slučaj utiskivanja od slučaja proizvodnje u čemu najviše sudjeluje smjer zasićivanja (imbibicija-dreniranje):

$$kh = \frac{162.5qB\mu}{m}$$

Razlika tlaka utiskivanja iz teoretske krivulje i onoga iz mjerene krivulje je mjera skin efekta. Pri tome je očito kako će eventualna negativna razlika odražavati povećanu propusnost u pribušotinskoj zoni, dok će pozitivna odražavati oštećenje bušotine.

Nekoliko parametara potrebno je precizno odrediti kako bi analitička interpretacija testova porasta/pada tlaka bila precizna: efektivna debljina,  $h$ , koja je ključna za određivanje efektivne propusnosti, a određuje se elektrokarotažom. Poroznost se određuje laboratorijski, kompresibilnost stijene zasićene fluidima se određuje specijalnim analizama jezgre stijene u laboratoriju, te PVT analizom fluida.

Analitička i kvalitativna interpretacija ispitivanja u bušotini je intenzivno raspravljana već 1950-ih godina. Test pada tlaka možda najsažetije, ali zorno teorijski i uz primjer su opisali Nowak i Lester (1954). Iz matematičke analize pada tlaka nakon utiskivanja vode i zatvaranja bušotine, demonstrirali su kako se može procijeniti ležišni tlak, injektivnost bušotine i oštećenje formacije u neposrednoj blizini bušotine. Zaključili su kako je za takvu analizu prije zaustavljanja utiskivanja potrebno stabilizirati bušotinu neprekidnim i konstantnim protokom koji traje barem tjedan dana tj. do momenta kad je efektom utiskivanja zahvaćena većina hidrodinamički povezanog područja. Naveli su primjer kako se dotičnim testom može detektirati stratigrafske neujednačenosti i rasjed. Međutim, zaključili su da se interpretacija krivulja može unaprijediti, proučavanjem pri nizu uvjeta ležišta, čime se naglašava značaj empirijskog karaktera interpretacije testiranja u bušotini.



#### 4. Sličnosti i razlike skladištenja nuklearnog otpada i CO<sub>2</sub>

Naftno inženjerstvo je već dugi niz godina struka unutar koje se najviše ulaže u istraživanje mogućnosti utiskivanja otpada koji nije nastao pri proizvodnji ugljikovodika. Kako postoji niz analogija sa sezonskim skladištenjem prirodnog plina, najviše se ispitivalo i istraživalo mogućnost uskladištenja CO<sub>2</sub>.

Ispitivane metode odlaganja ugljikovog dioksida i odlaganja nuklearnog otpada, temelje se na nizu usporedivih problema: geoloških, pitanja sigurnosti i nadzora, zakonskih regulativa, ali i percepcije javnosti o tim problemima.

Razvoj industrije rezultirao je povećanjem koncentracije ugljikovog dioksida u atmosferi. Smatra se kako bi koncentracija CO<sub>2</sub> u atmosferi od 450 ppm bila koncentracija koja može uzrokovati negativne i nepovratne klimatske promjene (Loš, 2009).

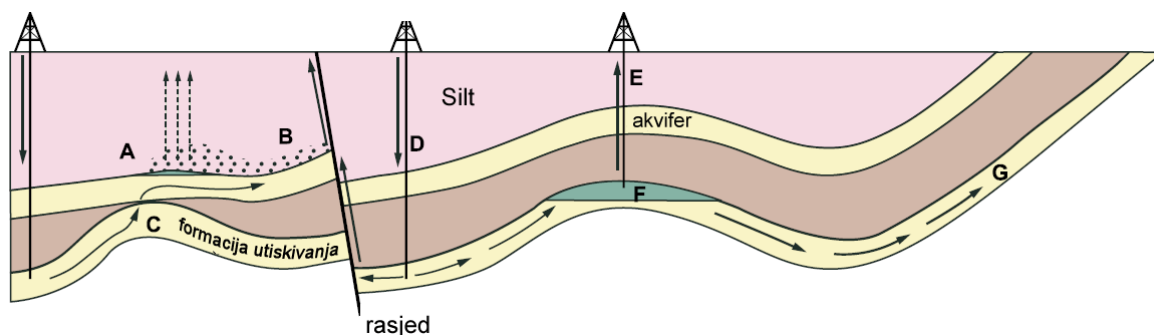
Odlaganje radioaktivnog otpada, kao i odlaganje CO<sub>2</sub> može se zvati *inverznom geološkom transformacijom* (Toth, 2011), zato što se za razliku od tradicionalnih geoloških istraživanja, odnosno istraživanja koja za cilj imaju pronalazak sirovina iz podzemlja i njihovu eksploataciju, istražuje pogodne prostore za trajno odlaganje otpada. U tu se svrhu, već desetljećima provode istraživanja kada se radi o radioaktivnom otpadu, i nešto kraće, istraživanja za odlaganje ugljikovog dioksida.

## 4.1. Uskladištenje CO<sub>2</sub>

Uskladištenje CO<sub>2</sub> podrazumijeva trajno odlaganje CO<sub>2</sub> u podzemlje, uz predviđanje da ne može migrirati prema manjim dubinama (zbog prisustva nepropusnih barijera) tisućama godina. Pri tome je najbitnije osigurati skladište od propuštanja, pošto je geološka barijera jedina koja zadržava CO<sub>2</sub> u podzemlju.

Mehanizmi propuštanja su (slika 4.1):

- Tlak utisnutog plina je veći od kapilarnog tlaka i prolazi kroz plitke formacije (silt)
- Slobodan CO<sub>2</sub> još brže prolazi prema površini uz rasjed
- CO<sub>2</sub> propušta kroz diskordanciju
- Utisnuti CO<sub>2</sub> koji migrira prema plićim dijelovima povećava ležišni tlak i propusnost rasjeda
- CO<sub>2</sub> propušta uz loše zatvorenu staru napuštenu bušotinu
- Prirodni tokovi otapaju CO<sub>2</sub> na razdjelnici CO<sub>2</sub>/slojna voda i transportiraju CO<sub>2</sub> dalje, izvan granica koje su bile predviđane da će „zatvoriti“ CO<sub>2</sub>
- Otopljeni CO<sub>2</sub> prolazi do površine ili u more.



Slika 4.1. Mehanizmi potencijalnog propuštanja (prilagođeno od IPCC, 2009).

Najsigurnija potencijalna skladišta bila bi stara iscrpljena plinska ležišta jer su dokazano zadržala plin tokom geološke prošlosti. Nešto manje sigurna su iscrpljena naftna ležišta, a ta smanjena sigurnost se očituje u različitosti protočnih karakteristika u slučaju protjecanja nafte od slučaja protjecanja CO<sub>2</sub>. Takva ležišta su češće većeg kapaciteta uskladištenja. Najmanju sigurnost u procjenama nepropusnosti i u procjenama skladišnog

volumena imaju duboki slani akviferi. Akviferi su najinteresantniji za procjenu jer i pored rizika, predstavljaju potencijalno daleko veći skladišni prostor od naftnih i plinskih ležišta.

#### **4.2. Usporedba zbrinjavanja CO<sub>2</sub> i nuklearnog otpada**

Postoji niz analogija, ali i različitosti u sakupljanju otpada nastalog izgaranjem fosilnih goriva i onog nastalog u nuklearnoj elektrani. Osnovne različitosti u procesu zbrinjavanja tih otpada na površinskom dijelu procesa sastoje su u načinu prihvata otpada, količini i transportu. Kaptaza stakleničkih plinova i odvajanje najznačajnijeg stakleničkog plina, CO<sub>2</sub> znatno bi poskupila proizvodnju električne energije u elektranama pogonjenim fosilnim gorivima. S druge strane, nuklearne elektrane, različitim mehanizmima (ovisno o državnim propisima) već uključuju u cijenu proizvedene električne energije trošak zbrinjavanja otpada. Kod nuklearnog otpada, radi se o vrlo malim količinama, te je transport relativno jednostavan i problemi transporta svode se na sigurnost spremnika s otpadom. Količine CO<sub>2</sub> koji treba transportirati do odlagališta, mjere se u megatonama, a moguće ga je transportirati cisternama ili cjevovodima. Pri tome velik značaj čini čistoća CO<sub>2</sub> koji bi uz minimalne primjese vode mogao stvarati bitne probleme s korozijom sustava.

Značajke geoloških medija koje se razmatraju prilikom odabira lokacije za odlaganje radioaktivnog otpada i ugljikovog dioksida su: tektonska stabilnost lokacije, vrsta geološke formacije i njene karakteristike, volumen odlagališta i dubina odlaganja, utjecaj prirodnih barijera oko odlagališta, agregatno stanje otpada, vrijeme na koje se otpad odlaže, mogućnost nadzora nad odlagalištem, kao i mogućnost budućeg ulaska u odlagalište.

Tektonska stabilnost lokacije neophodna je za odlaganje obje vrste otpada, iako postoje primjeri odlaganja radioaktivnog otpada i u tektonski nestabilnijem području (Japan).

Radioaktivni otpad odlaže se u nepropusne granitne, evaporitne i sedimentne stijene različitog tipa, niske propusnosti i dobrih izolatorskih svojstava. CO<sub>2</sub> se odlaže u sedimentne stijene, visoke poroznosti i propusnosti uz prisutnost prirodnih barijera, tj. nepropusnih okolnih (pokrovnih) stijena.

Volumen odlagališta potreban za utiskivanje CO<sub>2</sub> je vrlo velik, mjeri se u gigatonama utisnutog otpada, dok je volumen odlagališta radioaktivnog otpada mnogo manji zbog manje količine ove vrste otpada.

Ugljik dioksid je fluid, a radioaktivni otpad je u krutom stanju.

Odlaganje ugljik dioksida se provodi injektiranjem kroz bušotinu, dok se radioaktivni otpad pakira i sustavom tunela odvodi do konačnog odlagališta.

Dubine na koje se CO<sub>2</sub> injektira variraju od 800 pa i do 5000 m. Radioaktivni otpad, ovisno o vrsti odlaganja, odlažemo na dubinama između 200 i 1000 m, ali i sve do 5000 m.

Za zadržavanje CO<sub>2</sub> u odlagalištu potrebne su isključivo na prirodne barijere unutar formacije, dok kod odlagališta radioaktivnog otpada postoje prirodne, ali i izgrađene barijere.

Utjecaj koji CO<sub>2</sub> ima na područje oko odlagališta: povećanje tlaka, geokemijske reakcije ako je prisutna voda u formaciji. Radioaktivni otpad ima termalni utjecaj, javljaju se geomehaničke reakcije, biokemijski procesi.

Kako oko odlagališta CO<sub>2</sub> postoje samo prirodne granice uvijek postoji mogućnost povratka u biosferu, hidrosferu ili u atmosferu, za razliku od radioaktivnog otpada oko kojeg je niz prirodnih i izgrađenih granica i koji se nalazi u spremniku pa je mogućnost za povratak mala.

Nadzor se provodi tijekom radova, ali i nakon zatvaranja odlagališta.

Radioaktivni otpad ima utjecaj samo na ograničeno područje oko odlagališta kroz dugi period vremena, dok se očekuje da će se ugljikov dioksid širiti velikim prostorom u znatno kraće vrijeme, osim kod odlaganja u iscrpljena ležišta ugljikovodika, u kojima bi pod tlakom CO<sub>2</sub> mogao ostati na mjestu dugo vremena.

Iako je za obje vrste otpada potreban dug period za raspad, vremenski rokovi znatno su kraći za procjene odlaganja CO<sub>2</sub> i odnose se na stotine ili tisuće godina, dok se kod radioaktivnog otpada govori o 10 000, a čak 100 000 ili milijune godina.

## 5. Zaključak

Potencijalni produkti u skladištu radioaktivnih otpada su plinovi, kao rezultat radiolitičkog i termalnog propadanja organskih komponenti u otpadu, spremniku i stijeni oko spremnika. Da se smanji opasnost od porasta tlaka, poželjno je da ti plinovi migriraju u pribušotinsku zonu, ali ne i dalje u stijeni odlagališta.

Za analizu pogodnog lokaliteta za odlagalište moguće je primijeniti analogiju ispitivanja ležišnih svojstava korištenih za potrebe naftne industrije, tj. tehnologija ispitivanja je dobro definirana i razvijena, međutim, mjerenja se ne mogu interpretirati rutinski kao za potrebe proizvodnje fluida zbog značajki odlagališta.

Petrofizikalna svojstva mjerena osnovnim analizama mogu poslužiti za definiranje geološkog modela koji se temelji na seizmičkim geofizičkim ispitivanjima. Također, kako je i uobičajeno u praksi, služe za kalibraciji bušotinske karotaže kojom se dodatno može povećati pouzdanost geološkog modela odlagališta.

Testovi porasta/pada tlaka jedina su *in situ* ispitivanja, ali interpretirani rezultati djelomično ovise o laboratorijskim i karotažnim mjerenjima. Popćene krivulje rađene najčešće za slučaj zavodnjavanja, kada se radi o utiskivanju, nisu dovoljno pouzdane te je sigurnije testove u bušotini interpretirati individualnim krivuljama. Ipak, ne postoji druga pouzdanija metoda kojom se može dobro karakterizirati oštećenje pribušotinske zone isplakom prilikom bušenja. Povećanje propusnosti pribušotinske zone moguće je postići kiselinskom obradom stijena i frakturiranjem.

Za slučaj skladištenja, kao i općenito za slučajeve utiskivanja, uz kvalitetan geološki/petrofizikalni model najznačajniji je statistički opis petrofizikalnih podataka u

smislu određivanja heterogenosti. O mjeri heterogenosti ovisi način i smjer širenja fluida u odlagalištima, a također ovisi i interpretacija mjerenih ostalih rezultata.

Specijalne petrofizikalne analize mogu dati niz parametara koji daju odgovor na odstupanja ostalih mjerenih podataka od teoretskih proračuna. Tu se mogu izdvojiti mjerenja višefaznog protoka, određivanjem krivulje imbibicije i dreniranja. Također, kapilarni tlak je ključni mehanizam propuštanja fluida kad s namjerom nije nametnut tlak utiskivanja. Najrealnije rezultate dala bi ispitivanja plinova koji mogu nastati u odlagalištima, kako bi se sintetski mogli rekombinirati uzorci plina na kojima bi se radile analize interfacijalne napetosti (preduvjet za precizno određivanje kapilarnih tlakova), i topivosti te relativnih propusnosti pri ležišnim uvjetima.

Kada se govori o CO<sub>2</sub>, toksičnost CO<sub>2</sub> je skromna u odnosu na zračenje koje emitira radioaktivni otpad i koje je štetno i smrtonosno za većinu životinjskih vrsti, uključujući i ljude. Zato se odlagalište radioaktivnog otpada osigurava s nekoliko izgrađenih, ali i prirodnih barijera.

Iz tog razloga javnost, gledajući sa strane etike, teže prihvaća nuklearnu energiju i odlaganje nuklearnog otpada kao opciju od fosilnih goriva i odlaganja stakleničkih plinova. Međutim, sudeći prema dosadašnjim ispitivanjima na stvarnim lokacijama – rizik propuštanja CO<sub>2</sub> je znatno veći nego rizik propuštanja nuklearnog otpada. Zapravo, nuklearni otpad se već zakonski prihvaćeno odlaže u nizu država, dok su odlagališta CO<sub>2</sub> još uvijek većinski dio istraživačkih projekata.

Pored toga, definicija skladištenja CO<sub>2</sub> je takva da se bilo kakva upotreba CO<sub>2</sub> za dodatni iscrpak ugljikovodika ne ubraja u skladištenje. CO<sub>2</sub> je nerijetko prisutan u podzemlju kao fluid, npr. u Hrvatskoj ima ležišta plina koja sadrže i preko 30% CO<sub>2</sub> iz čega bi se moglo ustanoviti da je rizik propuštanja u fizikalnom smislu za odlagališta CO<sub>2</sub> veći nego rizik propuštanja nuklearnog otpada, ali posljedice po okoliš od količine CO<sub>2</sub> koja bi došla u pliće formacije ili čak do površine su manje nego u slučaju propuštanja radioaktivnog otpada.

Kada se govori i odlaganju nuklearnog otpada, ali i o odlaganju ugljikovog dioksida, važno je da svi subjekti i sastavnice sustava skrbi imaju samo jedan zajednički i pravi cilj, čija se poznata, pažljivo odmjerena formulacija već dulje vrijeme nije mijenjala:

*"Skrb o radioaktivnom otpadu ima za cilj da se radioaktivni otpad pohrani na takav način da se zaštiti ljudsko zdravlje i okoliš, sada i u budućnosti, ne namećući neopravdana opterećenja budućim naraštajima."*

## **6. Literatura**

1. ÅHÄLL, K.I., 2006.: Final Deposition of High-level Nuclear Waste in Very Deep Boreholes, Swedish NGO Office of Nuclear Waste Review (MKG)
2. AKEND, 2002. Site Selection Procedure for Repository Sites, Recommendations of the AkEnd-Committee on a Site Selection Procedure for Repository Sites, Köln, 2002
3. AMORINO, C. i dr., 2005.: CO<sub>2</sub> geological storage by ECBM techniques in the Sulcis area (SW Sardinia Region, Italy). Second International Conference on Clean Coal Technologies for Our Future, Castiadas.
4. AMYX, J.A., BASS, D.M. JR. I WHITING, R.L., 1960: Petroleum Reservoir Engineering, Physical Properties. New York City: McGraw Hill Book Co., 40
5. ARNOLD, B.W. i dr. (2011). : Reference Design and Operations for Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste, California, USA
6. B. LOŠ, 2009.: Tehnologije hvatanja i spremanja ugljikovog dioksida u elektroenergetskom sektoru – pregled relevantnog stanja, Zagreb
7. BUCKLEY, S.E., LEVERETT, M.C., 1942: Mechanism of Fluid Displacement in Sands, Transactions AIME, 146, 107-116.
8. DELAHAYE, C. I ALONSO, E., 1998.: Soil heterogeneity and preferential paths for gas migration, Key Issues in Waste Isolation Research, Proceedings of an International Workshop held in UPC, Barcelona, November, 1998
9. DELAHAYE, C. I ALONSO, E., 1999.: Modelling in Gas Migration of Clay. Mecom 99, Mendoza, 6-10. september, 1999.
10. FERENC L. TOTH, 2011.: Geological Disposal of Carbon Dioxide and Radioactive Waste: A Comparative Assessment
11. GORIČNIK, B., 1976.: Laboratorijske metode određivanja svojstava ležišnih stijena i fluida., Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu – INA Naftaplin, Zagreb
12. GRAHAM, J. i dr., 2002.: A capillarity-advective model for gas break-through in clays, Engineering Geology, 64, 273-286.
13. HOWELL, L.G. AND FROSCHE, A., 1939.: Gamma-ray welllogging, Geophysics,

4:106-114.

14. HUYSMANS M. I DASSARGUES A., 2005: Stochastic analysis of the effect of heterogeneity and fractures on radionuclide transport in a low permeability clay layer, *Environmental Geology*, 48(7), 920-930
15. HUYSMANS M. I DASSARGUES A., DASSARGUES, A., 2006.: Effect of excavation induced fractures on radionuclide migration through the Boom Clay (Belgium), *Applied Clay Science*, Volume 33, Issues 3–4, 207-218, ISSN 0169-1317
16. JOCKWER, N., 2006.: Experimental Studies on Gas Migration in Underground Rock Laboratories in Granitic and Argillaceous Rocks, *Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (GRS) Theodor-Heuss-Str.4, D 38122 Braunschweig, Germany*
17. KIM, A.G., 1977.: Estimating Methane Content of Bituminous Coalbeds From Adsorption Data. U.S. Bureau of Mines Report of Investigations, RI 8245
18. KLANFAR, M., VULIN, D., VEINOVIĆ, Ž., 2010: Procjena mogućnosti eksploatacije metana iz istarskih ugljena. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. 22; 73-80.
19. KLINKENBERG, L. J., 1941.: The Permeability of Porous Media to Liquids and Gases, *Drilling and Production Practice*, 200-213
20. LANDAIS, P., 2004.: Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement. *Applied Clay Science* 26 (1–4), 1.
21. LAW, B.E. AND RICE D.D. (EDS.), 1993., *Hydrocarbons from Coal*, AAPG Studies in Geology #38, American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma, 400 pp.
22. LEVANAT, I. 1997.: *Radioaktivni otpad*. Agencija za posebni otpad Zagreb, Zagreb
23. LEVERETT, M. C. 1941.: Capillary Behaviour in Porous Solids, *Trans. AIME*, Vol. 142, str. 152-169
24. LOCK, G.A. AND HOYER, W.A., 1971: Natural gamma-ray spectral logging. *The Log Analyst*, 12:3-9.
25. NOLVI L. , 2009: *Manufacture of Disposal Canisters*, Posiva Oy, Finland
26. NOWVAK T. J., LESTER G. W., 1955.: Analysis of pressure fall-off curves obtained in water injection wells to determine injective capacity and formation damage. *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 204, p.p. 96-102.
27. PIRSON, S.J., 1958.: *Oil Reservoir Engineering*, McGraw Hill 2nd Ed, NYC, p137-302 Ri
28. PURCELL, W. R., 1949: Capillary Pressures - Their Measurement Using Mercury and the Calculation of Permeability Therefrom, *Trans. AIME*, Littleton, USA, Vol. 186, str. 39-48
29. SCHEIDEGGER, A., E., 1960.: *The physics of flow through porous media*, New York, Macmillan, 1960.
30. SCHWEITZER, J.S., 1991.: *Nuclear techniques in the oil industry*, *Nuclear Geophysics*, 5:65-90
31. SERRA, O., J. BALDWIN I J. QUIREIN, 1980.: Theory, interpretation and practical applications of natural gamma-ray spectroscopy. *SPWLA 21 st Ann. Log.Symposium*,



- paper Q.
32. SWIFT N.P. i dr., 2009.: Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste. Sandia Report, SAND2009-4401.
  33. ŠABOVIĆ i dr., 2009.: Obrada i model konacnog zbrinjavanja radioaktivnog otpada, Tuzla, BiH
  34. T. McEWEN, 2004.: A review of the deep borehole disposal concept for radioactive waste, V. Britanija
  35. VAN GEET, M. i dr., (2007): Efficiency of a borehole seal by means of pre-compacted bentonite blocks Original Research Article Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Volume 32, Issues 1–7, 123-134
  36. VOLCKAERT G.L. i dr. (1997): MEGAS: modelling and experiments on gas migration in repository host rocks, European Commission Final Report - Phase 1, EUR 17453 EN, 1997.
  37. VULIN, D., 2012: Petrofizika ležišta ugljikovodika - Skripta za kolegije Višefazni protok u poroznoj stijeni i Fizika ležišta fluida, neslužbena skripta, RGN Fakultet, Zagreb
  38. WAHL, J.S., 1983.: Gamma-ray logging. Geophysics, 48(11):1536-1550.
  39. WELGE, H. J., 1949.: Displacement of Oil from Porous Media by Water or Gas, Trans. AIME, 179, 133
  40. WELGE, H. J., 1952.: A Simplified Method for Computing Oil Recovery by Gas or Water Drive, Petroleum Transactions, AIME, Volume 195, 1952, 91-98
  41. WORTHINGTON, P.F. i dr., 1990.: Sediment cyclicity from well logs. In: Hurst, A. et al. (eds.), Geological applications of wireline logs. Geol. Soc. of London, Spec. Publ. 48, 123-129