

PRIMJENA PETROFIZIKALNIH PODATAKA ZA OCJENU NEPROPUSNOSTI PODZEMNOG SKLADIŠTA NUKLEARNOG OTPADA

THE USE OF PETROPHYSICAL DATA FOR THE PERMEABILITY ASSESSMENT OF AN UNDERGROUND NUCLEAR WASTE REPOSITORY

DOMAGOJ VULIN, LIDIJA PERIĆ, TOMISLAV KUREVIJA

Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, HR-10000 Zagreb, Hrvatska

Ključne riječi: nuklearni otpad, podzemno odlaganje, petrofizikalne analize, nepropusne stijene

Key words title: nuclear waste, underground disposal, petrophysical analyses, impermeable seal

Sažetak

Odlagališta nuklearnog otpada trebaju osigurati da taj otpad ne nastupi odlagalište tisućama godina. Iako je otpad pohranjen u spremnike koji su planirani da izdrže i najekstremnije uvjete, neophodna je predostrožnost glede samog daljeg širenja produkata odlagališta kroz sloj u kojem se pohranjuje otpad. Tehnologija istraživanja nastala za potrebe naftne industrije na visokoj je razini i obuhvaća sve aspekte procjene ležišta. Osnovni zadatak istraživanja odlagališta otpada je definirati da ne postoje putevi kroz koje bi mogli fluidi iz odlagališta migrirati u strukture bliže površini. Za takvu procjenu, istraživanje se sastoji od definiranja geološkog modela pomoću bušotinske karotaže i 3D i 4D seizmike, zatim definiranja petrofizikalnih parametara kojima se kalibriraju karotazna mjerenja (odlagališta) i koji su ulazni podatak 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 polu-empirijskog karaktera interpretacije mjerenih podataka, neka mjerenja i proračune je u manjoj mjeri potrebno modificirati za posebni slučaj odlaganja nuklearnog otpada.

Abstract

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. Technology that was developed by petroleum exploration and production industry is at sophisticated enough to determine all geological and petrophysical aspects of the waste disposal. 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 used 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.

1. Uvod

Ključni aspekti odlaganja nuklearnog goriva su sigurnost, tehnička izvedivost i isplativost.

Radioaktivni materijali koji se koriste u različitim primjenama postaju, nakon nekog vremena, 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. Njegova će se radioaktivnost s vremenom smanjivati, te može postati neznatna već nakon nekoliko dana ili mjeseci, ali i otpad može ostati opasno radioaktivniji još dugi niz godina.

Kada se govori o konačnom odredištu tog 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:

- Niskoaktivni otpad kojeg karakterizira niska specifična gama i beta aktivnost (ispod 5 milijardi Bq/m³) i s zanemarivim je sadržajem aktinida. Aktinidi su alfa-emiteri i teški elementi s rednim brojem većim od 89.
- Srednjeaktivni otpad sadrži samo gama- i beta-emitere, uz zanemariv sadržaj aktinida, ali s većom aktivnošću nego kod niskoaktivnog otpada (do 5.000 milijardi Bq/m³).

- Visokoaktivni otpad karakteriziraju više specifične aktivnosti od navedenih i sadržaj aktinida. Prve dvije vrste potječu iz pogona nuklearnih elektrana, dok treća vrsta dolazi iz postrojenja za preradu istrošenog nuklearnog goriva i čini 90% ukupne radioaktivnosti otpada.

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

Pripremna obrada otpada početni je korak koji se sastoji od sakupljanja i razvrstavanja otpada, te dekontaminacije i manjeg kemijskog prilagođavanja. Obrada radioaktivnog otpada sastoji se od 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. Kondicioniranje radioaktivnog otpada čine operacije kojima se otpad prevodi u oblik prikladniji za rukovanje, prijevoz, skladištenje i odlaganje.

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.

Najperspektivniji načini odlaganja usmjereni su na odlaganje radioaktivnog otpada u tlo, a u razvoju strategija odlaganja u tlu, poluvijek radionuklida jedna je od najbitnijih odrednica u odlučivanju o načinu odlaganja. Otpad koji sadrži pretežno kratkoživuće radionuklide smješta se na površinu 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 ispod su razine tla, ali ne na velikoj dubini. Njihova izvedba uključuje zonu nedirnute stijene ili sedimenta iznad postrojenja koji fizički dijele odloženi otpad od površine i takav pristup znatno smanjuje rizik od nenamjernog upada ljudi.

Dugoživući radioaktivni otpad, kao i iskorišteno nuklearno gorivo, opasni su i nakon više tisuća godina, stoga je najsigurniji način zbrinjavanja duboko u čvrstim stjenkim masama uz poštivanje propisanih sigurnosnih mjera i pomoću bušotina velikog promjera.

2. Odlaganje radioaktivnog otpada u dubokim geološkim formacijama

Otpad je moguće pohranjivati u duboka podzemna odlagališta. Takvo se geološko odlaganje smatra najprikladnijim oblikom zbrinjavanja dugoživućeg radioaktivnog otpada, te je za očekivati da će osigurati dovoljnu izolaciju otpada iz okoline kroz stotine i tisuće godina za koliko se projektira i ispituje, odnosno sve dok ne nestane rizik koji taj otpad predstavlja za čovjeka i okoliš.

Sigurnost ovakvog načina odlaganja uvelike ovisi o geološkim karakteristikama okoliša kao i o sustavu višestrukih prepreka koje čine: stabilan oblik otpada, dugo-

vječna ambalaža u kojoj je otpad pohranjen, te trajnost ostalih izgrađenih struktura ili prirodnih prepreka karakterističnih za izabranu lokaciju odlagališta. Sve prepreke zajedno, shvaćene kao sustav, dostatne su za zadržavanje i izolaciju otpada.

Kada se govori o geologiji u okruženju bušotine istražuju se geološki slojevi, odnosno sedimentne, magmatске i metamorfne vrste stijena niske propusnosti. Propusnost stijena je bitno svojstvo zbog produkata koji mogu nastati anaerobnom korozijom metalnih spremnika (Pritsky i dr., 2006), čime bi se povećao tlak blizu spremnika. Dakle, plin bi trebao moći migrirati u pribušotinsku zonu ne stvarajući bitnu razliku od početnog tlaka. Pored toga, istražuju se odgovarajuća geokemijska svojstva, bez prirodnih resursa (uključujući i geotermalne izvore) i podzemnih voda koje ne ugrožavaju stabilnost spremnika s otpadom i oko njih izgrađenih prepreka, te zanemarive seizmičke i magmatске aktivnosti (Swift i dr., 2009.).

Otpad se odlaže u bušotine izbušene opremom namijenjenom za bušenje naftnih bušotina, na dubini koja iznosi prema novim istraživanjima i do pet kilometara (Karl-Inge Åhäll, 2006.).

Projekt i gradnja odlagališta moraju osigurati sve mjere potrebne za sprečavanje radiološkog učinka na stanovništvo i okoliš, uključujući posljedice planiranih i neplaniranih ispuštanja. Odlagalište je kompleksna tehnološka jedinica sa svim objektima i sustavima potrebnim za siguran i samostalan rad, a sastoji se od dva dijela; površinskog i podzemnog. Na površini je niz pogonskih, pomoćnih zgrada i zgrada za održavanje bez kojih bi djelovanje odlagališta pod zemljom bilo nemoguće, a koje služe za primanje, sušenje i pakiranje otpada u spremnik. 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 odlaže se trajno zapakiran otpad, odnosno tzv. spremnici s otpadom, za koje je važno da su izrađeni od materijala otpornih na koroziju da bi osigurali sigurno skladištenje kroz dugi niz godina. U tu svrhu koriste se spremnici izrađeni od bakra ili ugljičnog čelika.

Bakar je poznat po visokoj otpornosti na koroziju zbog vrlo stabilnog oksidiranog filma na njegovoj površini koji sprječava daljnju koroziju, a što je najvažnije, bakar je termodinamički stabilan u anaerobnim uvjetima (Nolvi, 2009.). Spremnik mora biti dovoljno velik za zbrinjavanje otpada, 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.

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

Uz stanovitu pažnju, analizi sigurnosti podzemnog skladišta (ponajviše zbog vrste plina, tj. vodika, ugljičnog

dioksida i metana kao glavnih produkata anaerobne ko-rozije, te kasnije $^{14}\text{CH}_4$ i $^{14}\text{CO}_2$ kao radioloških produkata nakon zatvaranja odlagališta, za koje je nešto drugačija relativna propusnost u stijeni i koji ima različitu interfacijalnu napetost te 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 bi trebalo imati takvu propusnost da može zadržati plin dugi niz godina. U slučaju naftnih podzemnih skladišta plina, najsigurnije su procjene iscrpljenih plinskih ležišta. Kod iscrpljenih plinskih ležišta, zadržavanjem plina u nekom geološkom vremenu, in situ je potvrđeno kako 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 skladište koje će zadržati plin bez gubitaka neki period, koji može biti i sezonski. Međutim, za navedenu svrhu, potrebno je skladištiti plin u hidrodinamički izolirano ležište, ali tako da je prirodni plin kasnije lako pridobiti natrag na površinu.

S druge strane, svojstva stijena koja se razmatraju kod proučavanja stijena kao potencijalnih kandidata za odlaganje nuklearnog otpada biti će izolatorske stijene, što zapravo može činiti procjenu i jednostavnijom jer nije potreban geološki model za veliko ležište.

Za procjene protočnih svojstava stijena postoji više razina istraživanja. U fazi geofizičkih seizmičkih istraživanja lociraju se potencijalne povoljne strukture. Zatim, izravniji tip mjerenja, koji daje manji broj podataka jest bušotinska karotaža. Bušotinskom karotažom moguće je odrediti točne dubine i debljine različitih vrsti stijena zasićenih različitim fluidima (ugljikovodici, voda). Karotažom se određuju za naftu i vodu nepropusne zone lapora i glina te zone propusnih pješčenjaka. Jezgrovanjem se pridobiva uzorak 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) definirali su 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 varijacije u tlaku kao pokazatelj heterogenosti. Mjesta s većim tlakom plina pokazala su se kao područja gdje je manje rezultatno naprezanje na stijenu i posljedično veća poroznost i propusnost. Mogućnost migracije plina pokazala se povećanom za slučaj stijene veće heterogenosti.

Graham, J. i dr., (2002) naveli su 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 i
- frakturiranjem 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 efikasnosti 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 ležišnom inženjerstvu.

Među ta ispitivanja spadaju osnovne petrofizikalne analize:

- raspodjele veličine zrna,
- poroznosti i
- apsolutne (plinske) propusnosti

te specijalne analize

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

Za ispitivanja porasta tlaka prilikom utiskivanja, 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 (valjčiču jezgre, najčešće promjera 1.5 inča) te podaci za kalibraciju bušotinske karotaže. Bušotinskom karotažom se pak dobiva puno veći broj podataka koji tek nakon kvalitetne kalibracije daju dovoljno precizne podatke.

3.1.1. Analiza prirodne radioaktivnosti – detekcija dubine segmenta s litologijom pogodnom za skladište.

Mjerenjem prirodne radioaktivnosti na jezgrama stijene određuje se prije svega udio kalija (%), urana (ppm) i torija (ppm) te kalibrirana ukupna gustoća. Metode

mjerenja prirodne aktivnosti 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).

Aparatura za bušotinsku karotažu gama zraka je najstarija karotaža nuklearnih anomalija korištena u naftnom inženjerstvu (Schweitzer, 1991). Gama karotaža potvrđena je kao najosnovnija geofizička metoda određivanja sedimentnih segmenata (Howell i Frosch, 1939; Lock i Hoyer, 1971; Serra, i dr., 1980; Wahl, 1983). Prirodno gama zračenje rezultat je radioaktivnog raspada izotopa ^{40}K , ^{238}U i ^{232}Th te njihovih nusprodukata koji se javljaju u stijeni. Različitosti u koncentraciji navedenih radioaktivnih izotopa pokazatelj su različitosti u mineraloškom sastavu. Tako će glinoviti segmenti stijene sadržavati povećanu koncentraciju kalija i torija, dok je povećana koncentracija urana povezana s protočnim sredinama vode i prisustvom stijena koje potencijalno sadrže ugljikovodike. Spektralna gama karotaža mjeri sadržaj tih izotopa po dubini u bušotini. U literaturi je potvrđeno kako je spektralna gama karotaža pogodna za detekciju 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, 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, bitno je znati bar 2 od navedenih parametara:

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

Ukupni volumen može se odrediti:

- 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.

Volumen pora može se izmjeriti:

- Volumetrijskom metodom, injektiranjem žive u pore uzorka ili mjerenjem izlaznog fluida prilikom desaturacije jezgre.

Za određivanje volumena zrna koriste se metoda određivanja gustoće usitnjene stijene piknometrom (apsolutna poroznost) i helijska porozimetrija, primjenom Boyleovog zakona

Za potrebe procjene volumena, zasićenja i protoka fluida u stijeni određuje se efektivna poroznost helijskom porozimetrijom. Princip mjerenja se sastoji u tome da se jezgra stavi u mjernu komoru porozimetra, volumena V_{mk} , pri atmosferskom tlaku ili vakuumu (p_2). Kada je zatvoren ventil između komora, 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 $p_1 > p_e > p_2$

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

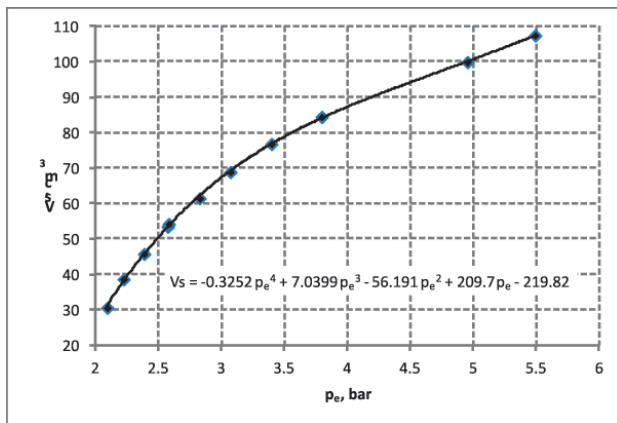
$$p_e (V_{ref} + V_{mk} - V_s) = p_1 V_{ref} + p_2 (V_{mk} - V_s) \quad (3.1.)$$

Središnjem 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 mjernoj 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 p_e nakon ekspanzije, ovisi o poroznosti analiziranog uzorka, točnije, o V_s . Koristeći metalne kalibracijske valjčice poznatog volumena, mjerenjem se određuje $V_s - p_e$ dijagram (slika 1.) ili analitička korelacija (najčešće polinom četvrtog stupnja). Iz kalibracijskog dijagrama se dalje, na temelju izmjenjenog p_e izravno očita V_s ispitivanog uzorka stijene.

Najčešća metoda određivanja poroznosti jest Helijska porozimetrija kojom se određuje apsolutna poroznost.

Slika 1. Kalibracijska krivulje za izravno određivanje V_s Figure 1. Calibration curve for direct V_s determination

3.1.3. Mjerenje plinske (apsolutne) propusnosti

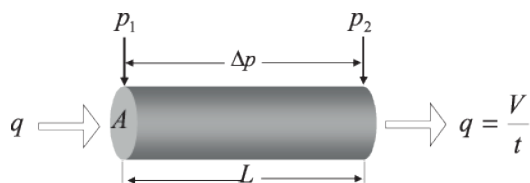
Mjerenje propusnosti osnovano je na Darcyevom zakonu za raspon tlakova u kojima se može zanemariti efekt stišljivosti plina:

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

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

$$k = \frac{VL}{tAp} \frac{\mu}{\Delta} \quad (3.4)$$

koja vrijedi kada se pri mjerenju rabi tekućina.



Slika 2. Model linearnog protoka kroz jezgru stijene

Figure 2. Linear flow model through the core

Kada se propusnost mjeri protokom plina, zbog kompresibilnosti plina protok na ulazu nije jednak protoku na izlazu, $q_1 < q_2$. Budući da pri konstantnoj temperaturi eksperimenta vrijedi

$$p_1 q_1 = p_2 q_2 = \bar{p} \bar{q}, \quad (3.5)$$

propusnost se računa uz srednji protok, \bar{p} :

$$\bar{p} = \frac{(p_1 + p_2)}{2} \quad (3.6)$$

$$i \quad \bar{q} = \frac{(p_2 q_2)}{\bar{p}} \quad (3.7)$$

tako da je

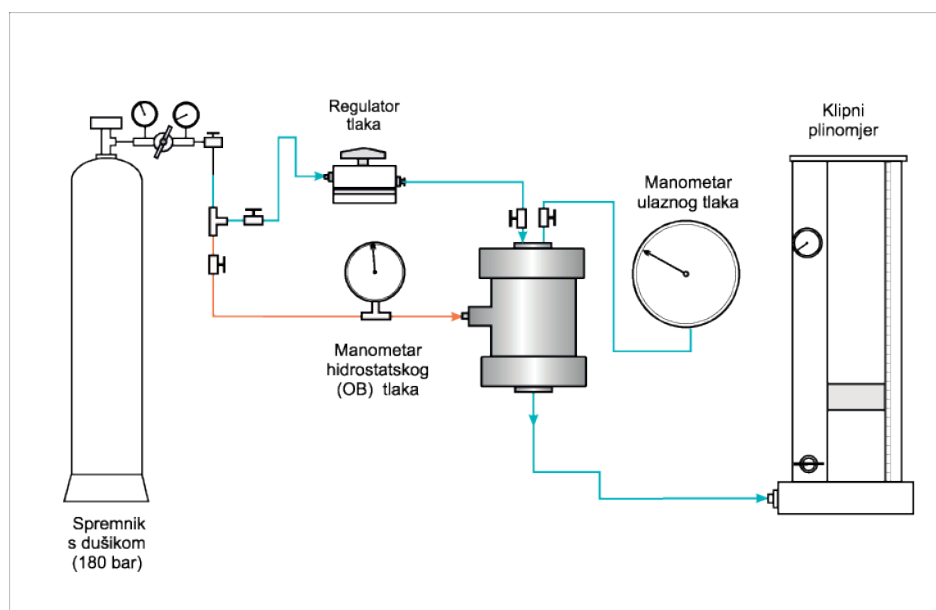
$$k = \frac{\bar{q}L}{A(p_1 - p_2)} \mu \quad (3.8)$$

Uređaj za mjerenje plinske propusnosti (slika 3.) se sastoji od boce s dušikom pod visokim tlakom, manometara za mjerenje simuliranog petrostatskog tlaka te ulaznog i izlaznog tlaka plina koji protiče, ma i regulatora tlaka 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.

Za plinsku permeometriju najčešće se koristi Hasslerov tip držača. Takav držač ima u sebi elastični gumeni rukavac koji osigurava dobro brtvljenje plina. Petrostatski (overburden, confining pressure) tlak između držača i gume dodatno pomaže brtvljenju uz gornji i donji poklopac. Za utiskivanje tekućine, koristi se drugačiji tip držača sa 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.

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.

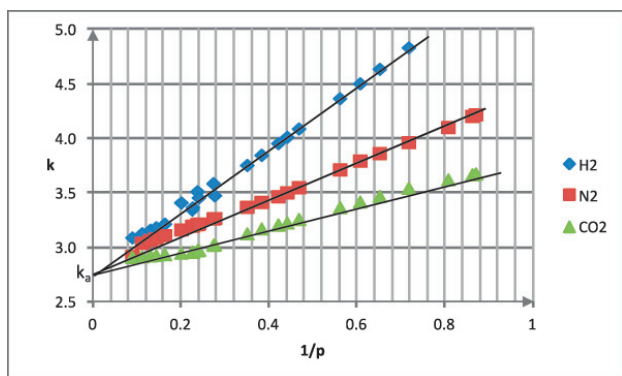


Slika 3. Shema uređaja za mjerenje propusnosti protokom plina. Dušik iz boce je izvor tlakova koji simuliraju petrostatski i porni tlak. Iako se na jezgru primjenjuje tlak cca 10 bar (bitno manji od petrostatskog), svrha je simulirati utjecaj ležišnog *efektivnog tlaka* koji je razlika pornog i petrostatskog.

Figure 3. Schematic of the gas permeability assembly. Pressure is obtained by the high pressure nitrogen tank and backpressure valve in order to simulate effects of the pore and overburden pressure. The principle is to obtain analogous effective overburden pressure i.e. difference between overburden and pore pressure.

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 taj Klinkenbergov efekt (slika 4.) 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 4. Korekcija za Klinkenbergov efekt (prema eksperimentalnim podacima iz Klinkenberg, 1941)

Figure 4. Klinkenberg correction lines (according to the experimental data from Klinkenberg, 1941)

3.2. Specijalne petrofizikalne analize

3.2.1. Mjerenje stlačivosti pora

U laboratoriju se vanjski, petrostatski 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:

$$c_p \approx - \frac{1}{V_p} \left(\frac{\Delta V_p}{\Delta p_{ef}} \right)_{\bar{\sigma}} \quad (3.9)$$

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

Okavako definiran c_p zove se koeficijent stlačivosti pora u točki (*instantaneous pore compressibility coefficient*)

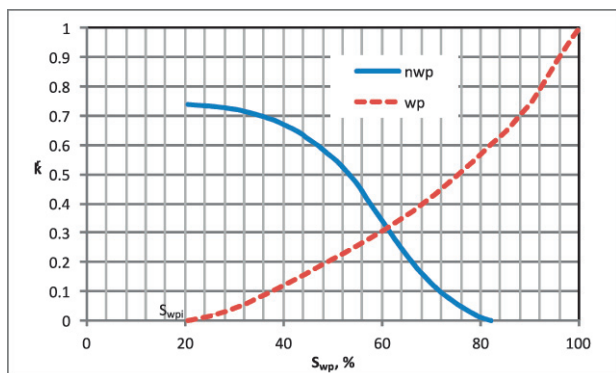
Veličina deformacije pornog prostora stijena općenito ovisi o:

- Litološkom, tj. mineralnom, i kemijskom sastavu stijena. Npr. stlačivost pješčenjaka iznosi 4 do $6 \cdot 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$, a vapnenaca od 20 do $25 \cdot 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$ (Fatt, 1958, Yale 1993.)
- Poroznosti stijena: što je manja poroznost, veća je stlačivost stijena.

3.2.1. Određivanje relativnih propusnosti

Relativna propusnost je omjer efektivne propusnosti jednog od fluida u slučaju zasićenja sa više od jedne faze (npr. nafta i voda) i neke referentne propusnosti (najčešće klinkenbergove apsolutne propusnosti):

$$k_{ro} = \frac{k_o}{k}, \quad k_{rw} = \frac{k_w}{k} \quad \text{i} \quad k_{rg} = \frac{k_g}{k} \quad (3.10)$$



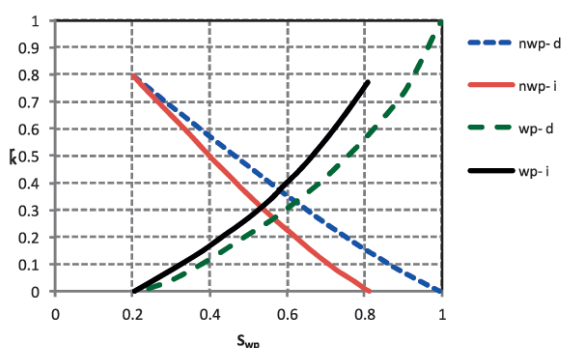
Slika 5. Prikaz odnosa zasićenja i relativnih propusnosti za močivu i nemočivu fazu (S_{wp1} - minimalno zasićenje močivom fazom tj. ireducibilno zasićenje, wp – močiva faza, nwp – nemočiva faza)

Figure 5. Saturation vs. Relative permeability for wetting and non-wetting phase (S_{wp1} – minimum wetting phase saturation, i.e. irreducible saturation, wp – wetting phase, nwp – non-wetting phase)

Analizom poopćene krivulje relativnih propusnosti (slika 5.) za močivu (najčešće slojna voda) i nemočivu fazu (ugljkovodični fluidi, plinovi) može se razlikovati nekoliko područja. Relativna propusnost močive faze može biti $k_r=1$ samo pri zasićenju močivom fazom 100%. Relativna propusnost močive faze brže pada smanjenjem njenog zasićenja, nego što pada relativna propusnost za nemočivu fazu (smanjenjem zasićenja nemočive faze). Relativna propusnost močive faze je $k_r=0$ pri ireducibilnom zasićenju močivom fazom. Točka zasićenja u kojoj je relativna propusnost nemočive faze $k_r=0$ zove se uravnoteženo zasićenje (*equilibrium saturation*).

Ovisno o smjeru zasićivanja, imamo dva tipa krivulja relativnih propusnosti (slika 6.):

- krivulja dreniranja, kada se smanjuje (*drainage curve*). Močiva faza se nadomješta, istiskuje, nemočivom fazom (u laboratoriju to je ekvivalentno npr. mjerenju saturacije živom, tj. Purcellovoj metodi)
- krivulja imbibicije, kada se povećava zasićenje močivom fazom, nemočivu fazu se istiskuje močivom



Slika 6. Relativne propusnosti, ovisno o smjeru zasićivanja (nwp-d = nemočiva faza-dreniranje, nwp- i = nemočiva faza - imbibicija, wp- d = močiva faza-dreniranje, wp- i = močiva faza - imbibicija)

Figure 6. Relative permeability for imbibition and drainage process (nwp-d = non-wetting phase drainage, nwp- i = non-wetting phase - imbibition, wp- d = wetting phase drainage, wp- i = wetting phase - imbibition)

Poznavanje relativnih propusnosti ključno je 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:

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

Većina podataka relativnih propusnosti mjeri se u laboratoriju *unsteady state* metodom jer je brza, tehnički jednostavna i može se raditi na malim uzorcima (Gorič-

nik, 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 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 se mogu izračunati jedino omjeri relativnih propusnosti (npr. k_{rg}/k_{rw}).

3.2.2. Mjerenje kapilarnih tlakova u stijeni

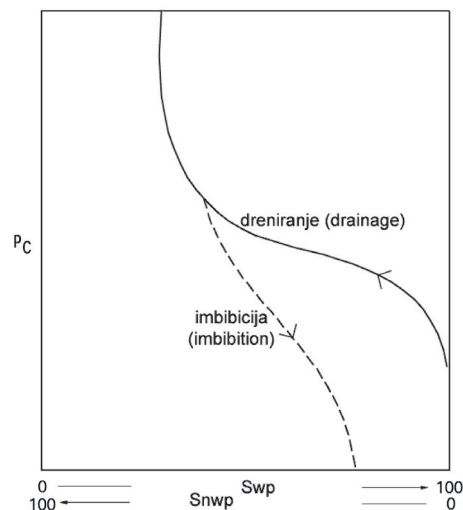
Mjerenje kapilarnih svojstava stijene može služiti procjeni niza karakteristika ležišta. Iz osnovnih jednažbi, statističkom obradom krivulje, moguće je odrediti raspodjelu različitih razreda radijusa pornih kanala. Također, moguće je procijeniti dizanje močivog i težeg fluida u više strukture zbog kapilarnih sila. Ovakav podatak bi mogao poslužiti i procjenama migracije plinova u skladištu, 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 7.), tj. različite su u slučaju da nemočivi fluid istiskuje močivog (dreniranje) od slučaja kad močivi fluid istiskuje nemočivog (imbibicija).

Eksperimentalne metode određivanja kapilarnog tlaka su:

1. metoda desaturacije uzorka stijene (*restored state method*)
 - tehnikom polupropusne membrane (dijafragme)
 - tehnikom centrifugiranja i
2. metoda saturacije uzorka stijene injektiranjem 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).



Slika 7. Krivulja kapilarnog tlaka

Figure 7. Capillary pressure curve

Relativne propusnosti se mogu analitički pridobiti u koliko je poznata krivulja kapilarnog tlaka za raspon od ireducibilnog zasićenja, S_{irr} do 100% zasićenja močivim fluidom. Prema Purcellovoj jednažbi (1949), može se 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:

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

Relativna propusnost za močivu fazu je tada:

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

Analogno se može pisati za nemočivu fazu:

$$k_{rnt} = \frac{k_{nt}}{k} = \int_{S_{wt}}^1 \frac{dS}{P_c^2} / \int_0^1 \frac{dS}{P_c^2} \quad (3.13)$$

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.

3.3. Ispitivanja metodom pada tlaka u bušotini

Za spremnik nuklearnog otpada, metodom pada tlaka radi se hidrodinamički test podzemnog skladišta. Različito 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
- 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):

- Propusnost za plin u izolatorskoj stijeni
- Propusnost za vodu u izolatorskoj stijeni
- Dvofazni protok u izolacijskoj stijeni
- Propusnost za plin i vodu u okolnim stijenama skladišta.

Najjednostavniji pristup ispitivanju u bušotinama je povezan s teorijske jednadžbe difuziviteta za konstantni protok, 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, oštećenje pribušotinske zone isplakom za bušenje (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 eventualno mogu primijeniti testovi koji se koriste za utisne bušotine iako treba uzeti u obzir da se sami 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, $I_{in} = Q_{in} / (p_{in} - \bar{p})$, ($\text{bar}^{-1}\text{m}^3/\text{s}$), 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_{yf}). Posljednji dio ispitivanja se sastoji u prestanku utiskivanja i *fall-off* periodu pada tlaka u kojem se mjere temperatura i tlak na dnu (p_{ws}) i ušću (p_{ts}) bušotine.

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 Δt teži u beskonačnost, tj. kada se $\Delta t / (t_p + \Delta t)$ približava jedinici (Hornerova metoda).

Mjereni podaci o tlaku, protoku i vremenu se često preračunavaju u takav oblik da bi se mogle koristiti tipске krivulje temeljene na bezdimenzionalnim parametrima. Tipске krivulje se koriste za interpretaciju testiranja bušotina i konstantno se unaprjeđuju. Jednadžbe koje se primjenjuju uz tipске 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 ucertavanje 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 tipске krivulje (također dostupne uz svaki set tipskih krivulja).

Na primjeru su (slika 8.) uspoređene tri krivulje:

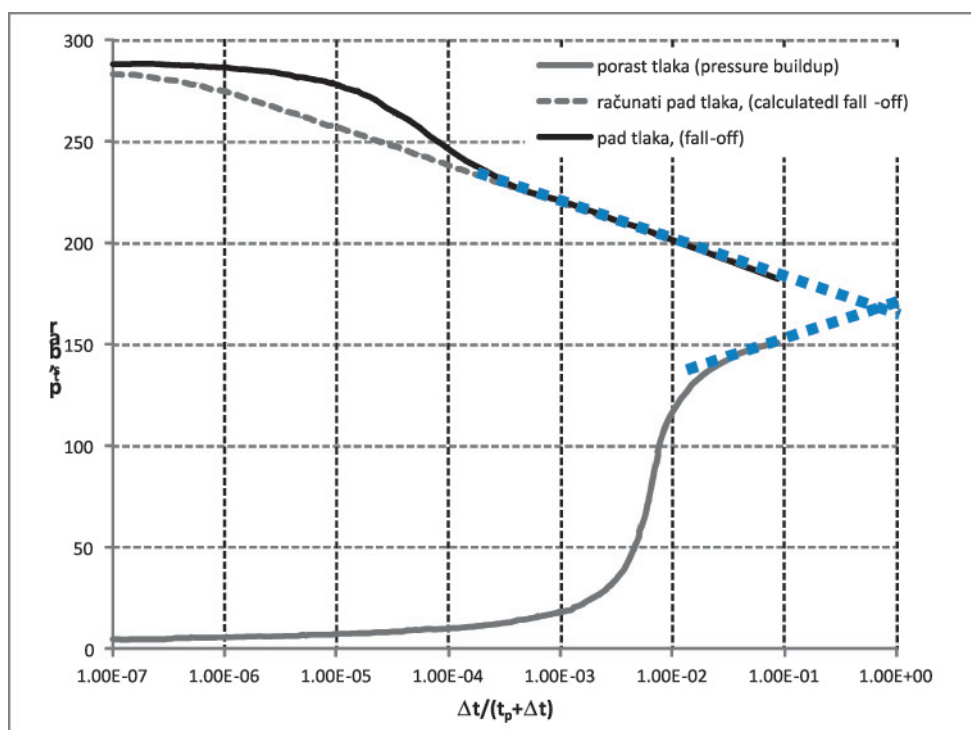
- 1) - krivulja iz testa porasta tlaka
- 2) - krivulja iz testa pada tlaka
- 3) - računati teoretski pad tlaka

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 (Δt) 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 8. Rezultati mjerenja testovima porasta i pada tlaka

Figure 8. Results of the pressure buildup and fall-off test

Prosječni statički tlak, za neograničeni tip ležišta određuje se ekstrapolacijom krivulje do nekog beskonačnog vremena Δt 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 bar/log(ciklus) i za *fall-off* test se uzima pozitivna vrijednost.

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

$$kh = \frac{162.5qB\mu}{m} \quad (4.1)$$

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, određuje se elektrokarotazom, 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 diskutirana već 1950-ih godina. Test pada tlaka možda najsazetije, a zorno teorijski i uz primjer opisali su 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, navode i da se interpretacija krivulja može unaprijediti, proučavanjem pri nizu uvjeta ležišta, čime se naglašava značaj empirijskog karaktera interpretacije testiranja u bušotini.

4. 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 kalibraciji bušotinske karotaže kojom se dodatno može povećati pouzdanost geološkog modela odlagališta.

- Testovi porasta/pada tlaka jedina su *in situ* ispitivanja, ali interpretirani rezultati ovise o laboratorijskim i karotažnim mjerenjima. Poopćene 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 međupovršinske napetosti (preduvjet za precizno određivanje kapilarnih tlakova), i topivosti te relativnih propusnosti pri ležišnim uvjetima.

Nomenklatura

- A - protočna površina, m^2
- B - volumni faktor, m^3/m^3
- c_p - kompresibilnost pora, bar^{-1}
- h - efektivna debljina protočnog intervala, m
- k - koeficijent apsolutne propusnosti, mD
- k_r - relativna propusnost
- l - duljina protočnog segmenta, m
- m - nagib, $bar/vremenski\ ciklus$
- S - zasićenje, dij. jed. (ili %)
- 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, cm^3
- V_p - Volumen pora uzorka, cm^3
- V_{mk} - volumen mjerne komore porozimetra, cm^3
- V_{ref} - volumen referentne komore porozimetra, cm^3
- V_s - Volumen zrna uzorka, cm^3
- μ - viskoznost, $mPas$
- θ - kut močivosti, rad
- ϕ - poroznost, dij. jed.
- Δp_{ef} - promjena efektivnog tlaka, bar
- σ - površinska napetost, dyn/cm

5. 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. 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
3. Arnold, B.W. i dr. (2011). : Reference Design and Operations for Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste, California, USA
4. Buckley, S.E., Leverett, M.C.(1942): Mechanism of Fluid Displacement in Sands, Transactions AIME, 146, 107-116.
5. 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
6. Delahaye, C. i Alonso, E., (1999): Modelling in Gas Migration of Clay. Mecom 99, Mendoza, 6-10. september, 1999.
7. Fatt, I. (1958): Pore Volume Compressibilities of Sandstone Reservoir Rocks. Journal of Petroleum Technology, pp. 64-66.
8. Goričnik, B. (1976):laboratorijske metode određivanja svojstava ležišnih stijena i fluida., Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu – INA Naftaplin, Zagreb
9. Graham, J. i dr., (2002): A capillarity-advective model for gas break-through in clays, Engineering Geology, 64, 273-286.
10. Howell, L.G. and Frosch, A., (1939): Gamma-ray welllogging, Geophysics, 4:106-114.
11. 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
12. 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
13. 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
14. Klinkenberg, L. J., (1941): The Permeability of Porous Media to Liquids and Gases, Drilling and Production Practice, 200-213
15. Landais, P., (2004): Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement. Applied Clay Science 26 (1-4), 1.

16. Levanat, I. (1997): Radioaktivni otpad. Agencija za posebni otpad Zagreb, Zagreb
17. Leverett, M. C. (1941): Capillary Behaviour in Porous Solids, Trans. AIME, Vol. 142, str. 152-169
18. Lock, G.A. and Hoyer, W.A., (1971): Natural gamma-ray spectral logging. The Log Analyst, 12:3-9.
19. Nolvi L. (2009): Manufacture of Disposal Canisters, Posiva Oy, Finland
20. 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.
21. Pirson, S.J. (1958): Oil Reservoir Engineering, McGraw Hill 2nd Ed, NYC, p137-302 Ri
22. Pritsky i dr. (2006.): Assessment of Gas Producing Radioactive Waste Disposal, Journal of Electrical Engineering, Vol. 57, NO. 4, 2006, 235-237
23. 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
24. Scheidegger, A., E., (1960): The physics of flow through porous media, New York, Macmillan, 1960.
25. Schweitzer, J.S., (1991): Nuclear techniques in the oil industry, Nuclear Geophysics, 5:65-90
26. Serra, O., J. Baldwin and J. Quirein, (1980): Theory, interpretation and practical applications of natural gamma-ray spectroscopy. SPWLA 21 st Ann. Log.Sympos, paper Q.
27. Swift N.P. i dr., (2009): Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste. Sandia Report, SAND2009-4401.
28. 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
29. Volckaert G.L. i dr. (1997): MEGAS: modelling and experiments on gas migration in repository host rocks, European Comission Final Report - Phase 1, EUR 17453 EN, 1997.
30. Wahl, J.S., (1983): Gamma-ray logging. Geophysics, 48(11):1536-1550.
31. Welge, H. J., (1949): Displacement of Oil from Porous Media by Water or Gas, Trans. AIME, 179, 133
32. Welge, H. J., (1952): A Simplified Method for Computing Oil Recovery by Gas or Water Drive, Petroleum Transactions, AIME, Volume 195, 1952, 91-98
33. 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, 123-132.
34. Yale, DP, (1993): Nabor, GW, Russell, JA. Application of Variable Formation Compressibility for Improved Reservoir Analysis. SPE 68th Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas

THE USE OF PETROPHYSICAL DATA FOR THE PERMEABILITY ASSESSMENT OF AN UNDERGROUND NUCLEAR WASTE REPOSITORY

Nuclear waste repositories should be designed in order to maintain the waste for several thousand years. The main petrophysical properties that should be observed for such repositories are properties that are related to fluid migration, i.e. brine-gas relative permeability, injectivity and change in fluid saturation due to capillary pressure. Gases that have to be taken into account are products of anaerobic metal corrosion of tanks (iron and aluminium), and radiolysis of matrix and water. Products of corrosion are usually hydrogen, methane and carbon dioxide, and products of radiolysis are $^{14}\text{CH}_4$ i $^{14}\text{CO}_2$. 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. Technology that was developed by petroleum exploration and production industry is as sophisticated enough to determine all geological and petrophysical aspects of the waste disposal. The main task is to determine if there is possibility of leakage pathways in the repository rock. In this work are described the most common methods for determining flow properties of the rock: grain granulation, porosity, and absolute permeability. It was described how the gas permeability measured with nitrogen can be corrected for Klinkenberg-effect in order to obtain absolute permeability. Then utilisation of several special core analyses was proposed - the main interrelationships between mechanical rock properties, i.e. pore compressibility and porosity, and consequently permeability. Furthermore, there was explained importance of capillary pressure curves and its correlation with curves of relative permeabilities. Relative permeabilities curves can describe possibility of gas products migration through the brine saturated rock. Also, it was necessary to point out the phenomena of saturation curve hysteresis, which leads to different relative permeability curves depending on two possible directions of saturation process - imbibition and drainage.

Petrophysical measurements give data required for well-log calibration and input data for reservoir flow calculations and simulations.

For a nuclear waste disposal site, the most common method for predicting injectivity that was found in literature is *fall-off* test. Main parameters that are involved in pressure decline curve analysis are described. Injectivity in the case of nuclear waste disposal is tested because of possible danger due to pressure increase because of gaseous products generation.

Well testing of pressure changes can give validation of lab data, and can be used 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 re-

pository. In order to reduce the risk of pressure increase it is desired for gas products to migrate in the near-wellbore area, but not far from the disposal. Prediction of gas migration requires geological and petrophysical model, in order to describe rock heterogeneity. Heterogeneity determines final fluid saturation topology.

The most accurate petrophysical properties and rock fluid flow properties would give analyses conducted with a brine and synthetic gas compositions, with the same composition as the products of the waste disposal gaseous products.