

# Ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće i plinopropusnosti prešanog bentonita

---

**Mikec, Matija**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2016**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:749025>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-04**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće i plinopropusnosti prešanog bentonita**

Diplomski rad

Matija Mikec

R 143

Zagreb, 2016.

*Ovim putem zahvalio bih se mentoru dr.sc. Veinović, Želimiru na korisnim savjetima, te pruženoj pomoći. Posebno bih se zahvalio dr.sc. Vulin, Domagoju na uloženom trudu i pomoći pri laboratorijskim mjerenjima, te dr.sc. Briševac, Zlatku na popoći prilikom pripremanja uzoraka.*

*Također se zahvaljujem djelatnicima tvrtke Hidraulika-centar za izradu svih verzija kalupa, te djelatnicima tvrtke Geokon - Zagreb, u čijim su laboratorijima vršena neka ispitivanja.*

*Koristim ovu priliku da se zahvalim i kolegama, studentima RGNF-a Demoli, Dinu i Pofuk, Ivanu na tehničkoj pomoći pri radu u laboratoriju, savjetima prilikom svih faza izrade diplomkog rada, djevojci Vitezić, Maji na podršci i pomoći u fazi pisanja rada.*

*Na kraju, zahvaljujem se ocu Damiru i majci Đurđi na pruženoj podršci tijekom studija, što moralnoj što financijskoj, bez vaše podrške ne bi bilo moguće studirati!*

Ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće i plinopropusnosti prešanog bentonita

MATIJA MIKEC

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za rudarstvo i geotehniku  
Pierottijeva 6, 10002 Zagreb

Sažetak

U radu su opisana i provedena tri ispitivanja prešane bentonitne gline. Također, prikazan je proces pripreme uzoraka i izrade potrebne aparature. Cilj rada bio je odrediti srednju vrijednost propusnosti, poroznosti i jednoosne tlačne čvrstoće pripremljenih uzoraka te kritički ocijeniti mogućnost primjene istih u odlagalištu visoko radioaktivnog otpada. U ispitivanju je korišten prah natrijskog bentonita komercijalnog naziva *Saline seal 100* poljske tvrtke Cetco. Ispitivanja su provedena u dva laboratorija, laboratoriju za petrofiziku i ležišne fluide RGNF-a i geomehaničkom laboratoriju tvrtke Geokon-Zagreb. Na temelju rezultata istraživanja zaključeno je da se materijal može koristiti za ugradnju u odlagalište istrošenog nuklearnog goriva.

Ključne riječi: bentonit/prešani bentonit, radioaktivni otpad, istrošeno nuklearno gorivo, odlagalište radioaktivnog otpada, jednoosna tlačna čvrstoća, propusnost, poroznost

Diplomski rad sadrži: 79 stranica, 24 tablica, 65 slika, 23 reference.

Jezik izvornika: hrvatski

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

Voditelj: Dr. sc. Želimir Veinović, docent RGNF-a  
Pomoć pri izradi: dr.sc. Zlatko Briševac, viši asistent  
dipl. ing. Helena Vučenović, znanstveni novak  
Ocjenjivači: Dr. sc. Želimir Veinović, docent RGNF-a  
Dr. sc. Domagoj Vulin, izvanredni profesor RGNF-a  
Dr. sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF-a

Datum obrane: 9. rujan 2016.

Examination of one axial compressive strength and permeability of compacted bentonite clay

MATIJA MIKEC

Thesis completed in: University of Zagreb

Faculty of Mining, Geology and Petroleum engineering

Institute of Mining and Geotechnics,

Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

#### Abstract

Three examinations of compacted bentonite clay were conducted. Also, the sample making procedure is shown and thoroughly explained. The aim was to determine the average value of permeability, porosity and one axial compressive strength and to a critically value measured data in case of building material in final repository. In this laboratory testing the material used was a powder of sodium bentonite clay commercially known as Saline seal 100 produced by polish company Cetco. Testings took place at two laboratories, petrophysical laboratory at RGNF and the geo-mechanical laboratory of the company Geokon-Zagreb. After testings it is concluded that the material tested is an acceptable option for building in final repository for spent nuclear fuel.

Keywords: bentonite/ compacted bentonite, radioactive waste, spent nuclear fuel, nuclear waste repository, one axial compressive strength, permeability, porosity.

Thesis contains: 79 pages, 24 tables, 65 figures, 23 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Supervisor: PhD Želimir Veinović, Assistant Professor

Technical support and assistance: Phd Zlatko Briševac, Senior Assistant  
Ing Helena Vučenović, Researcher

Reviewers: PhD Želimir Veinović, Assistant Professor

PhD Domagoj Vulin, Associate Professor

PhD Dubravko Domitrović, Assistant Professor

Date of defense: September 9, 2016.

## SADRŽAJ

1. Uvod .....	1
2. Radioaktivni otpad.....	2
2.1 Podjela i svojstva .....	3
2.2 Načini odlaganja .....	4
2.3 Odlagalište KBS – 3 .....	9
2.3.1 Predviđeni dizajn .....	9
2.3.2 Tehničke karakteristike odlagališta KBS – 3V.....	10
3. Inženjerske barijere u odlagalištima visokoradioaktivnog otpada i iskorištenog nuklearnog goriva.....	14
3.1 Bentonitna glina – materijal i svojstva .....	14
3.2 Ispitivanja bentonitne gline kao moguće inženjerske barijere.....	17
3.2.1 Ispitivanje bentonita u svrhu kontrole kvalitete .....	19
4. Laboratorijsko ispitivanje prešanog bentonita.....	21
4.1 Priprema uzoraka .....	21
4.1.1 Izrada kalupa.....	21
4.1.2 Prešanje bentonitne gline.....	25
4.1.2.1 Prešanje bentonitne gline u svrhu ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće.....	26
4.1.2.2 Prešanje bentonitne gline u svrhu ispitivanja permeabilnosti i poroznosti .....	30
4.2 Ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće .....	34
4.3 Ispitivanje permeabilnosti i poroznosti.....	46
4.3.1 Poroznost .....	46
4.3.2 Permeabilnost (propusnost).....	53
4.3.2.1 Pregled rezultata mjerenja.....	57
4.3.2.2 Analiza izmjerenih vrijednosti propusnosti.....	69
5. Rasprava .....	71
5.1 Tehnički problemi.....	71
5.2 Prijedlog nastavka istraživanja .....	73
6. Zaključak .....	74
7. Literatura .....	77

## POPIS SLIKA

Slika 2-1. Pripovršinsko odlagalište RAO (Koeberg Alert Alliance, 2016). .....	5
Slika 2-2. Prikaz inženjerskih barijera na pripovršinskom odlagalištu (Domitrović et al., 2012). .....	6
Slika 2-3. Odlaganje u vertikalne bušotine (lijevo), odlaganje u horizontalne bušotine (desno) (Baldwin et al., 2008). .....	7
Slika 2-4. Aksijalno odlaganje (lijevo), aksijalno postavljen superkontejner (desno) (Baldwin et al., 2008). .....	7
Slika 2-5. Aksijalno postavljen superkon., betonska ispuna hodnika (lijevo), aksijalno postavljen superkon. veliki promjer (desno) (Baldwin et al., 2008). .....	8
Slika 2-6. Galerije, odlaganje čeličnih višenamjenskih kontejnera (lijevo), odlaganje kanistara ili kanistara s betonskom oblogom (desno) (Baldwin et al., 2008). .....	8
Slika 2-7. Odlaganje u duboke vertikalne bušotine (lijevo), hidraulički kavez (desno) (Baldwin et al., 2008). .....	8
Slika 2-8. Prikaz modela odlagališta KBS – 3V (Morén, 2010). .....	10
Slika 2-9. Presjek vertikalne bušotine, dimenzije slojeva ispune (Eriksson, 2014). .....	11
Slika 2-10. Korozija bakrenog spremnika. ....	12
Slika 2-11. Izgled bakrenog spremnika za ING (Morén, 2010). .....	12
Slika 2-12. Prešana bentonitna glina oblika kocke (lijevo), bentonitni peleti (desno) (Morén, 2010). .....	13
Slika 2 – 13. Shematski prikaz geometrijskog rasporeda ispune tunela. (Arvidsson et al., 2015). .....	13
Slika 3-1. Struktura montmorillonita (Blažević, 2007.). .....	15
Slika 3-2. Ambalažno pakiranje Saline seal 100 gline. ....	16
Slika 3-3. Detalj pakiranja, masa i proizvođač. ....	16
Slika 3-4. Saline seal 100 u petrijevoj zdjelici. ....	16
Slika 4-1. Kalup 1 – 3D model. ....	22
Slika 4-2. Kalup 1, cilindar (lijevo) i plašt (desno). ....	23
Slika 4-3. 3D model Kalup 2 zatvoren. ....	24
Slika 4-4. 3D model Kalup 2 otvoren. ....	24
Slika 4-5. Kalup 2, nakon izrade. ....	25
Slika 4-6. Shematski prikaz rasporeda slojeva prilikom prešanja bentonitne gline u četiri sloja (1,2), pojednostavljena očekivana ploha sloma (3). .....	26
Slika 4-7. a) masa uzorka 1, b) masa uzorka 1 nakon prešanja, c) proces prešanja. ....	27

Slika 4-8. Masa uzorka br. 2 (lijevo), izgled uzorka (desno). .....	28
Slika 4-9. Izgled i izlazna masa uzorka 4. ....	29
Slika 4-10. Oštećenje na cilindru kalupa 1. ....	29
Slika 4-11. Prešani uzorci u posudi sa silika-gelom. ....	31
Slika 4-12. Postav opreme prilikom prešanja. ....	32
Slika 4-13. Slom uzorka prilikom vađenja iz kalupa otvaranjem. ....	32
Slika 4-14. Istiskivanje prešanog uzorka iz kalupa 2. ....	33
Slika 4-15. Dobiveni uzorak (lijevo), mjerenje dimenzija promjera (desno). ....	33
Slika 4-16. Shematski prikaz uređaja za jednoosni posmik (Kvasnička i Domitrović, 2007). .....	34
Slika 4-17. Uzorak 1 pripremljen za mjerenje jednoosne tlačne čvrstoće. ....	36
Slika 4-18. Grafički prikaz sile sloma u vremenu, uzorak 1. ....	37
Slika 4-19. Grafički prikaz pomaka u vremenu, uzorak 1. ....	37
Slika 4-20. Grafički prikaz sile sloma u vremenu, uzorak 2. ....	38
Slika 4-21. Grafički prikaz pomaka u vremenu, uzorak 2. ....	39
Slika 4-22. Slom uzorka, uzorak 2. ....	39
Slika 4-23. Grafički prikaz sile sloma u vremenu, uzorak 3. ....	40
Slika 4-24. Grafički prikaz pomaka u vremenu, uzorak 3. ....	40
Slika 4-25. Slom uzorka, uzorak 3. ....	41
Slika 4-26. Grafički prikaz sile sloma u vremenu, uzorak 4. ....	42
Slika 4-27. Grafički prikaz pomaka u vremenu, uzorak 4. ....	42
Slika 4-28. Slom uzorka, uzorak 4. ....	43
Slika 4-29. Grafički prikaz sila sloma uzoraka 1 – 4. ....	44
Slika 4-30. Grafički prikaza pomaka uzoraka 1 – 4. ....	45
Slika 4-31. Ukupna poroznost (desno), odnos efektivne i ukupne poroznosti (lijevo) (Vulin, 2012). ....	46
Slika 4-32. Shema uređaja za mjerenje poroznosti helijskom porozimetrijom (Vulin, 2012). .....	47
Slika 4-33. Oprema za mjerenje poroznosti. ....	49
Slika 4-34. Kalibracijska krivulja. ....	50
Slika 4-35. Srednje vrijednosti poroznosti uzoraka i tipične vrijednosti nekih stijena. ....	52
Slika 4-36. Shema protjecanja fluida kroz stijenu (Vulin, 2012). ....	53
Slika 4-37. Shematski prikaz protoka fluida uz odgovarajuće oznake (Vulin, 2012). ....	55



Slika 4-38. Shematski prikaz uređaja za mjerenje propusnosti protokom plina (Vulin, 2012). .....	55
Slika 4-39. Shematski prikaz hidrostatskog držača jezgre (Vulin, 2012). .....	56
Slika 4-40. Ovisnost prosječnih vrijednosti propusnosti i bočnog tlaka, uzorak 8. ....	58
Slika 4-41. Ovisnost prosječnih vrijednosti propusnosti i bočnog tlaka, uzorak 8. ....	61
Slika 4-42. Ovisnost prosječnih vrijednosti propusnosti i bočnog tlaka, uzorak 9. ....	63
Slika 4-43. Prosječne vrijednosti propusnosti u ovisnosti o bočnom tlaku, uzorci 10 i 11. 65	
Slika 4-44. Grafički prikaz promjene tlaka $p_1$ tijekom mjerenja. ....	66
Slika 4-45. Ovisnost prosječnih vrijednosti propusnosti o bočnom tlaku, uzorak 12. ....	68
Slika 4-46. Pukotine uzrokovane maksimalnim ulaznim tlakom, uzorak 12. ....	69
Slika 5-1. Puknuće vara nosača vijaka za spajanje kalupa. ....	72
Slika 6-1. Jednoosna tlačna čvrstoća, nekih stijena i glina. ....	74

## POPIS TABLICA

Tablica 2-1. Udio nisko, srednje i visoko radioaktivnog otpada u nuklearnoj elektrani (Fond za financiranje razgradnje i zbrinjavanja RAO i ING Nuklearne elektrane Krško, 2016)....	3
Tablica 2-2. Postupci smanjenja volumena nisko i srednje radioaktivnog otpada (Fond za financiranje razgradnje i zbrinjavanja RAO i ING Nuklearne elektrane Krško, 2016) .....	4
Tablica 3-1. Tražena svojstva bentonita za primjenu u tamponu. Vrijednosti za Na/Ca-bentonit (Domitrović et al., 2012). .....	18
Tablica 4-1. Uzorci za ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće.....	26
Tablica 4-2. Sila, tlak i dimenzije uzoraka za ispitivanje poroznosti i permeabilnosti. ....	30
Tablica 4-3. Mase uzoraka za ispitivanje permeabilnosti i poroznosti.....	30
Tablica 4-4. Usporedba izračunatih parametara uzoraka. ....	44
Tablica 4-5. Metode mjerenja parametara potrebnih za određivanje poroznosti (Vulin, 2012). .....	46
Tablica 4-6. Dimenzije, volumen kalibracijskih valjčića. ....	49
Tablica 4-7. Poroznost uzoraka 7-12.....	50
Tablica 4-8. Tipične poroznosti nekih stijena/ tala.....	52
Tablica 4-9. Zapis mjerenja propusnosti, uzorak 7. ....	57
Tablica 4-10. Prosječne vrijednosti propusnosti u mD i u m <sup>2</sup> .....	58
Tablica 4-11. Zapis mjerenja propusnosti, uzorak 8. ....	60
Tablica 4-12. Prosječne vrijednosti propusnosti izrađene u mD i u m <sup>2</sup> . ....	60
Tablica 4-13. Zapis mjerenja propusnosti, uzorak 9. ....	62
Tablica 4-14. Prosječne vrijednosti propusnosti izražene u mD i m <sup>2</sup> .....	62
Tablica 4-15. Zapis mjerenja propusnosti, uzorak 10. ....	64
Tablica 4-16. Zapis mjerenja propusnosti, uzorak 11. ....	64
Tablica 4-17. Prosječne vrijednosti propusnosti uzoraka 10 i 11.....	65
Tablica 4-18. Zapis mjerenja propusnosti, uzorak 12. ....	67
Tablica 4-19. Prosječne vrijednosti propusnosti izražene u mD i m <sup>2</sup> .....	67
Tablica 4-20. Vrijednosti p <sub>1</sub> i OB u svrhu konačnog određivanja propusnosti.....	69
Tablica 4-21. Raspon propusnosti ležišnih stijena, modificirano iz (Zornjak, 2009.). ....	70

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SI JEDINICA

SKB	<i>šve. Svensk Kärnbränslehantering AB</i> – Švedska tvrtka za zbrinjavanje nuklearnog goriva i radioaktivnog otpada
RAO	radioaktivni otpad
NRAO	nisko radioaktivni otpad
SRAO	srednje radioaktivni otpad
NiSRAO	nisko i srednje radioaktivni otpad
VRAO	visoko radioaktivni otpad
ING	istrošeno nuklearno gorivo
NE	nuklearna elektrana
NEK	nuklearna elektrana Krško
APO	agencija za posebni otpad
ASTM	<i>engl. American Society for Testing and Materials</i> – Američko društvo za ispitivanja i materijale

<u>Oznaka</u>	<u>Jedinica</u>	<u>Opis</u>
<i>A</i>	m <sup>2</sup>	- površina
<i>i</i>	-	- hidraulički gradijent
<i>P</i>	Pa	- tlak
<i>t</i>	s	- vrijeme
<i>T</i>	°C	- temperatura
<i>V</i>	m <sup>3</sup>	- volumen
<i>ρ</i>	kg/m <sup>3</sup>	- gustoća
<i>k</i>	m/s	- hidraulička vodljivost
<i>m</i>	g	- masa
<i>h, H</i>	cm	- duljina
<i>d</i>	cm	- promjer
<i>σ<sub>c</sub></i>	Mpa	- tlačno naprezanje
<i>u</i>	m/s	- površinska brzina

## 1. Uvod

Istrošeno nuklearno gorivo (ING) nastaje pri proizvodnji električne energije u nuklearnim elektranama u nuklearnom gorivnom ciklusu, a visokoradioaktivni otpad (VRAO) preradom istrošenog goriva. Dok se ING može preraditi, VRAO nema buduću namjenu i nije ga moguće reciklirati. Budući da se može preraditi ING se ne smatra otpadom, ali se u planovima za odlagališta ING-a primjenjuju gotovo identične tehnologije kao i u planovima odlagališta VRAO. Osnovni problem koji se mora riješiti pri odlaganju oba ova materijala je dugoročna stabilnost skladišta radi onemogućenja kontakta radionuklida sa okolišem i podzemnim vodama.

U veljači 2016. g. u Europi je bilo u pogonu 180 nuklearnih elektrana, a 16 u izgradnji. Najviše električne energije iz nuklearne proizvodi Francuska (76,9%), zatim Slovačka (56,8%), Mađarska (53,6%) i Ukrajina (49,4%) (European nuclear society, 2016).

Imajući na umu navedene podatke, odnos prema VRAO i ING postaje sve važnije pitanje, s obzirom da do sada postoji samo jedno prihvaćeno rješenje za odlaganje – „finski koncept“. Iako Švedska i Finska ne prednjače po broju nuklearnih elektrana, vodeći su kada se radi o istraživanjima na polju zbrinjavanja RAO. Osim Finskog, „najdotjeranija“ je i spremna za primjenu švedska KBS – 3V metoda (model odlaganja ING). Model predlaže odlaganje ING u duboke geološke formacije (do 700 m dubine), u vertikalne bušotine obložene prešanim prstenovima, diskovima bentonitne gline.

## 2. Radioaktivni otpad

Ovisno o autoru postoji nekoliko definicija radioaktivnog otpada (RAO). Zakon o odgovornosti za nuklearnu štetu daje općenitiju definiciju radioaktivnog otpada, dok enciklopedijska literatura pribjegava znanstvenijem pristupu, a najjednostavnije radioaktivni otpad definira Fond za financiranje razgradnje i zbrinjavanja radioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva nuklearne elektrane Krško.

Radioaktivni otpad je izraz koji se često koristi u širem kontekstu nego što je sama definicija takvog otpada. Naime, radioaktivni otpad je materijal koji sadrži ili je kontaminiran radionuklidima, a ne može se preraditi ili ga nije isplativo preraditi za ponovnu ili daljnju uporabu. Istrošeno nuklearno gorivo, na primjer, nije nužno radioaktivni otpad već se nakon prerade ponovo može koristiti kao gorivo (Fond za financiranje razgradnje i zbrinjavanja RAO i ING Nuklearne elektrane Krško, 2016.).

Radioaktivni otpad je materijal koji sadrži prirodne radioaktivne nuklide i/ili nuklearnim reakcijama umjetno stvorene radionuklide u udjelima većima od prirodnih a nema praktičnu primjenu. Potencijalno je opasan za okoliš i zdravlje pučanstva pa ga valja tretirati na prikladan način. Radioaktivni otpad nastaje procesiranjem tvari (npr. ugljen, nafta, plin, minerali) koje sadrže radionuklide prirodnih uranijevih i torijevih nizova te korištenjem radionuklida u dijagnostičke i terapijske svrhe u medicinskim ustanovama; industrija i znanstvenoistraživačke ustanove također stvaraju manje količine radioaktivnog otpada, a najveće količine nastaju kao posljedica aktivnosti svake od faza nuklearnoga gorivnog ciklusa (Hrvatska enciklopedija, 2016).

Radioaktivni proizvodi ili otpad su radioaktivni materijali koji su nastali u procesu proizvodnje ili korištenjem nuklearnog goriva ili drugi materijali koji su postali radioaktivni zbog toga što su bili izloženi zračenju emitiranom tijekom navedenog procesa, isključujući radioizotope koji su nastali u završnoj fazi proizvodnje i koji se mogu koristiti u znanstvene, medicinske, poljoprivredne, trgovačke ili industrijske svrhe (Narodne novine, 143/98).

## 2.1 Podjela i svojstva

Pri klasifikaciji radioaktivnog otpada koriste se svojstva RAO: koliko će vremena otpad biti radioaktivan, koliki je udio radioaktivnoga materijala u otpadu i stvara li otpad toplinu. Međunarodno su prihvaćene sljedeće kategorije radioaktivnog otpada: vrlo nisko, nisko, srednje i visoko radioaktivan otpad (Hrvatska enciklopedija, 2016).

Vrlo nisko radioaktivni otpad sadrži zanemarivu specifičnu aktivnost pa nije opasan za okoliš i zdravlje pučanstva i može se zbrinjavati na isti način kao i standardni komunalni otpad (Hrvatska enciklopedija, 2016).

Nisko radioaktivni otpad (NRAO) sadrži malu specifičnu aktivnost i zanemariv udio radionuklida s dugim vremenom poluraspada. Stvara se u medicinskim ustanovama, industriji i nuklearnom gorivnom ciklusu. Pri rukovanju i transportu toga otpada nije potrebno koristiti štitove od nuklearnoga zračenja. Radi smanjivanja volumena otpad se kompaktira ili spaljuje. Konačno zbrinjavanje provodi se odlaganjem u površinsko odlagalište (plitko ukapanje) (Hrvatska enciklopedija, 2016). Zajedno sa srednje radioaktivnim otpadom tvori 95% volumnog udjela otpada u NE (tablica 2-1).

Tablica 2-1. Udio nisko, srednje i visoko radioaktivnog otpada u nuklearnoj elektrani (Fond za financiranje razgradnje i zbrinjavanja RAO i ING Nuklearne elektrane Krško, 2016).

Vrsta RAO	Volumni udio otpada	Udio radioaktivnosti
NiSRAO	95%	1%
VRAO (ING)	5%	99%

Srednje radioaktivni otpad (SRAO) sadrži veću specifičnu aktivnost pa je pri rukovanju i transportu potrebno koristiti štitove od nuklearnoga zračenja. Nastaje u pogonu nuklearnih reaktora i pri razgradnji nuklearnih elektrana. Otpad se prvo solidificira u betonu ili bitumenu, a konačno zbrinjavanje ovisi o vremenu poluraspada prisutnih radionuklida. Otpad koji sadrži radionuklide s kratkim vremenom poluraspada zbrinjava se u površinskom odlagalištu, dok se otpad s radionuklidima s dugim vremenom poluraspada zbrinjava u dubokim podzemnim odlagalištima (Hrvatska enciklopedija, 2016).

Tablica 2-2. Postupci smanjenja volumena nisko i srednje radioaktivnog otpada (Fond za financiranje razgradnje i zbrinjavanja RAO i ING Nuklearne elektrane Krško, 2016)

<b>Postupak</b>	<b>Tvari za koje se koristi postupak</b>	<b>Faktor smanjenja volumena</b>
<b>Sabijanje u bačvu niskotlačnom prešom</b>	Tkanina, plastika, lim, kabeli, sitna oprema	Do 4 puta
<b>Super – kompaktiranje bačvi</b>	Tkanina, plastika, papir, lim, manji metalni dijelovi	Do 10 puta
<b>Paljenje</b>	Sve zapaljive tvari	Do 30 puta
<b>Rezanje</b>	Sve tvari	Do 2 puta

Tablica 2-2. prikazuje moguće postupke u svrhu smanjenja volumena nisko i srednje radioaktivnog otpada.

Visokoradioaktivni materijal koji treba zbrinjavati pojavljuje se u dva oblika: kao istrošeno nuklearno gorivo (ING) koje se može preraditi i poradi toga ne smatra otpadom te fizijski produkti dobiveni preradbom istrošenoga goriva – visokoradioaktivni otpad (VRAO). Prije konačnoga zbrinjavanja svaki od tih dvaju materijala valja posebno obraditi. Istrošeno se gorivo radi hlađenja i smanjenja radioaktivnosti privremeno pohranjuje (na 20 do 50 godina) na lokaciji nuklearne elektrane u bazenu za istrošeno gorivo, a nakon barem 4 godine i u suhim skladištima. Fizijski produkti najprije se prevode u čvrsti oblik njihovom ugradnjom u posebnu vrstu borosilikatnoga stakla (vitifikacija), a zatim se radi hlađenja i smanjenja radioaktivnosti pohranjuju u privremenom odlagalištu. Konačno se zbrinjavaju odlaganjem u stabilne geološke formacije na dubini od 500 do 1000 m (Hrvatska enciklopedija, 2016). Ovi materijali tvore 5% volumnog udjela otpada, ali 99% radioaktivnosti NE (tablica 2-1).

## 2.2 Načini odlaganja

Važan faktor u gospodarenju i zbrinjavanju RAO je koncentracija dugoživućih radionuklida u otpadu. Prihvaćena je praksa odlaganja RAO s niskom koncentracijom dugoživućih radionuklida u odlagališta na ili blizu površine zemlje, na mjestima s povoljnim geološkim karakteristikama, udaljenim lokacijama, sa suhom klimom, s umjetnim barijerama radi sprječavanja ispuštanja radionuklida iz odlagališta. Za radioaktivni otpad s višim koncentracijama potreban je složeniji sustav zaštite. Idealno, sustav zaštite i

zadržavanja radionuklida trebao bi biti kombinacija prirodnih i umjetnih barijera kako bi se postigla potrebna razina sigurnosti (Tomić, 2015).

Može se reći da su odlagališta projektirana prema otpadu koji se u njih odlaže, no postoje određene razlike u regulatornim zahtjevima pojedine države, razlike u stajalištima šire javnosti i lokalnih zajednica.

Odlagališta NiSRAO prema Agenciji za posebni otpad (APO) može se podijeliti na (Levanat, 2000.):

1. Pripovršinska odlagališta:
  - a) Jednostavna pripovršinska odlagališta,
  - b) Pripovršinska postrojenja za odlaganje s izgrađenim barijerama (slika 2-1.).
2. Podzemna odlagališta:
  - c) Napušteni rudnici,
  - d) Namjenski iskopane prostorije.

Prema (Plećaš i Pavlović, 2003.) odlagališta se dijele na:

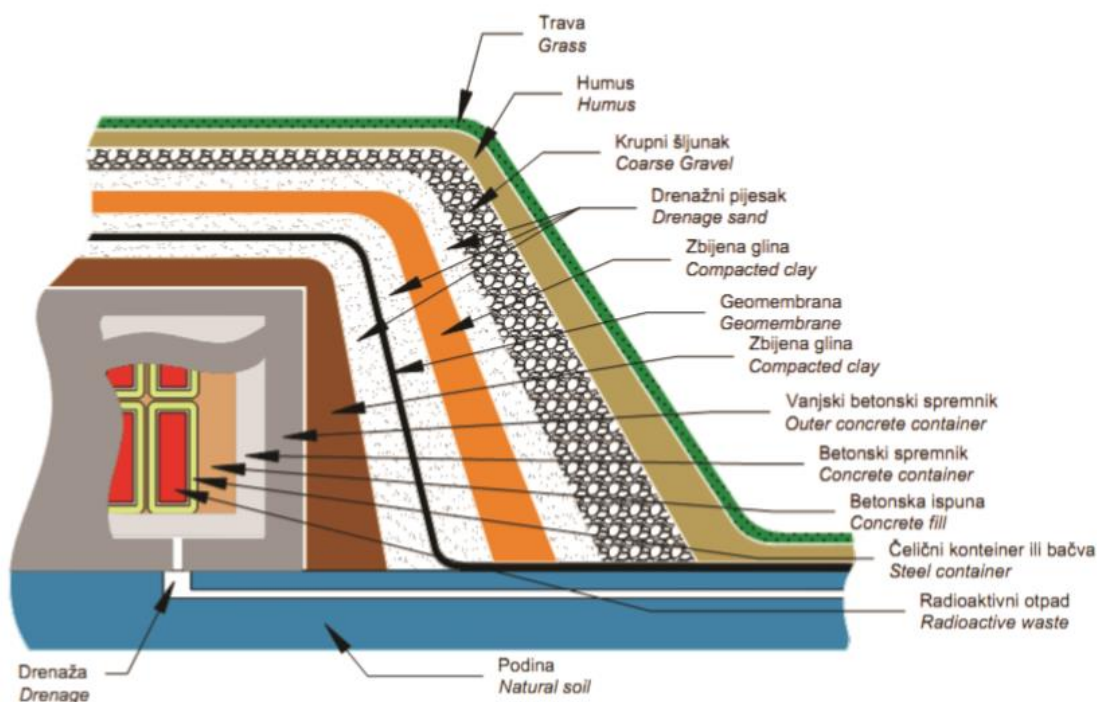
1. Jednostavno plitko ukopano ili površinsko odlaganje (slika 2-1.),
2. Sistem betonskih plitkih inženjerskih jaraka (slika 2-2.),
3. Napuštene rudnike,
4. Geološke formacije.



Slika 2-1. Pripovršinsko odlagalište RAO (Koeberg Alert Alliance, 2016).



Bitno je primijetiti da se prema različitim autorima razlikuju nazivi tipova odlagališta, no svi govore o istim tehnikama zbrinjavanja NRAO, SRAO i VRAO. Inženjerske barijere (slika 2-2.), tj. prepreke zračenju, uz ljudsko zdravlje i ne narušavanje okoliša, postavljene su kao imperativ. Ukapanje VRAO na veće dubine nužno je zbog duljine života radionuklida u ovom tipu otpada, otpad mora ostati potpuno izoliran, tj. u radiološki nepropusnom odlagalištu i do 100 000 godina.



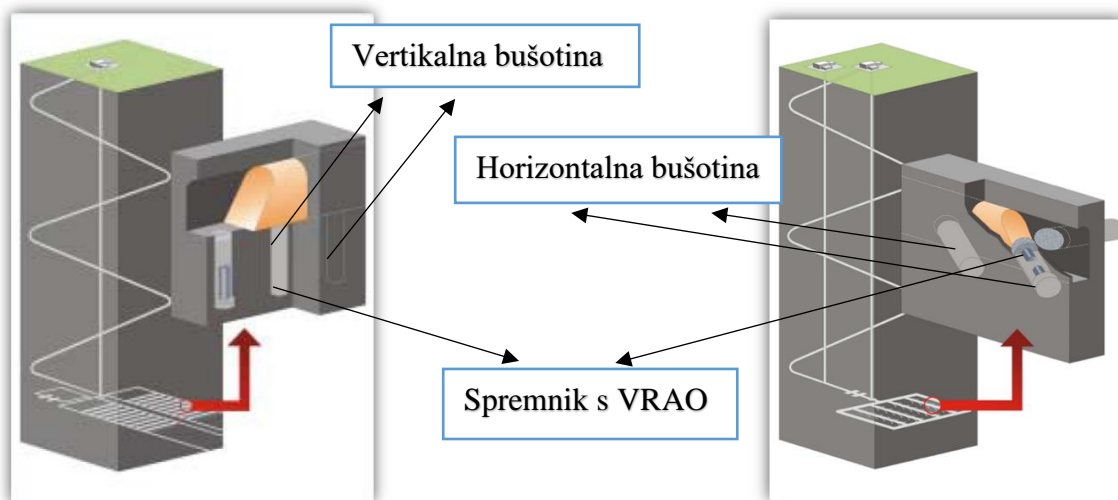
Slika 2-2. Prikaz inženjerskih barijera na pripovršinskom odlagalištu (Domitrović et al., 2012).

Pojmovi kao podzemna odlagališta, geološke formacije i duboka geološka odlagališta podrazumijevaju isti tip odlagališta radioaktivnog otpada koji je gotovo uvijek vezan uz VRAO i/ili ING. Specifičnost ovog tipa odlagališta je dubina odlaganja i tehnički izazovi koje predstavlja. Osim samog iskopa podzemnih prostorija, otpad je potrebno prevesti do konačne lokacije u odlagalištu, odgovarajući ga odložiti, zabrtviti te osigurati potpunu izolaciju otpada u sljedećih 100 000 godina. Tijekom godina razvijeno je desetak metoda odlaganja od kojih su neke potpuno napuštene, a neke su zaživjele kao eksperimentalno odlagalište (KBS- 3 metoda, Švedska).

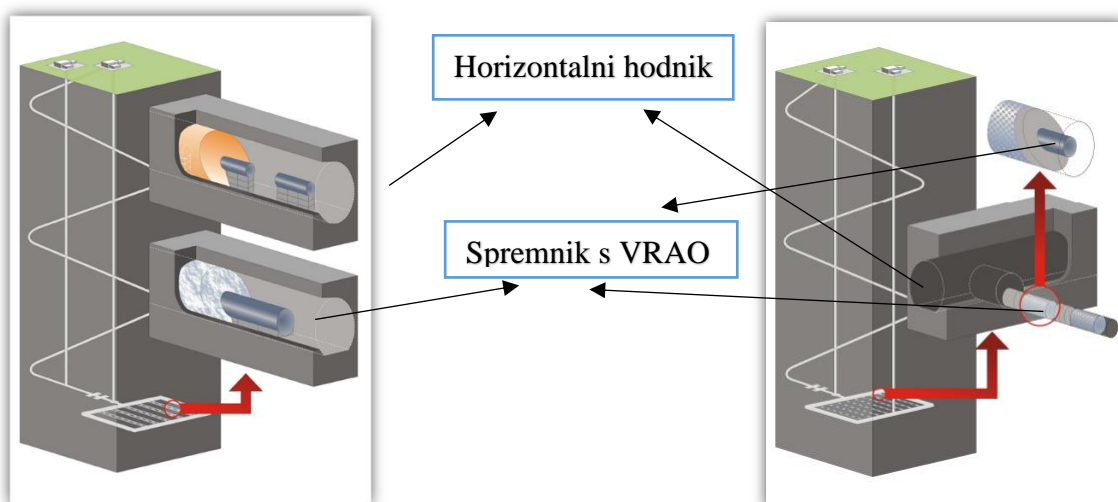
Načini odlaganja u podzemna odlagališta (Baldwin et al., 2008):

- a. Tunel – odlaganje u vertikalne bušotine (slika 2-3.)

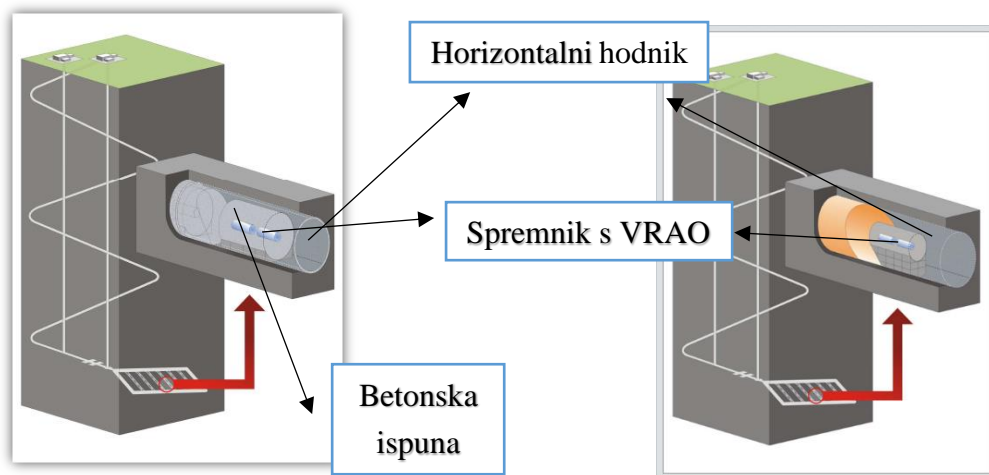
- b. Tunel – odlaganje u horizontalne bušotine (slika 2-3.)
- c. Tunel – aksijalno odlaganje spremnika (slika 2-4.)
- d. Tunel – aksijalno postavljen superkontejner (slika 2-4.)
- e. Tunel – aksijalno postavljen superkontejner s betonskom ispunom (slika 2-5.)
- f. Tunel – aksijalno postavljen superkontejner, veliki promjer (slika 2-5.)
- g. Tunel – vertikalne duboke bušotine (slika 2-7.)
- h. Galerije – odlaganje u čelične višenamjenske kontejnere (slika 2-6.)
- i. Galerije – odl. u čelične kanistre ili kanistre s betonskom oblogom ( slika 2-6.)
- j. Hidraulički kavez (slika 2-7.)



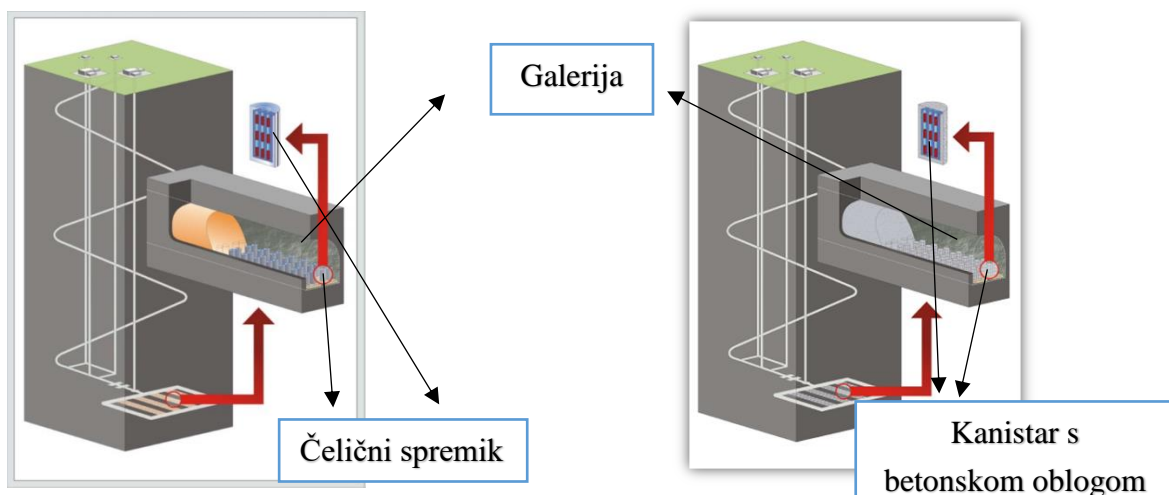
Slika 2-3. Odlaganje u vertikalne bušotine (lijevo), odlaganje u horizontalne bušotine (desno) (Baldwin et al., 2008).



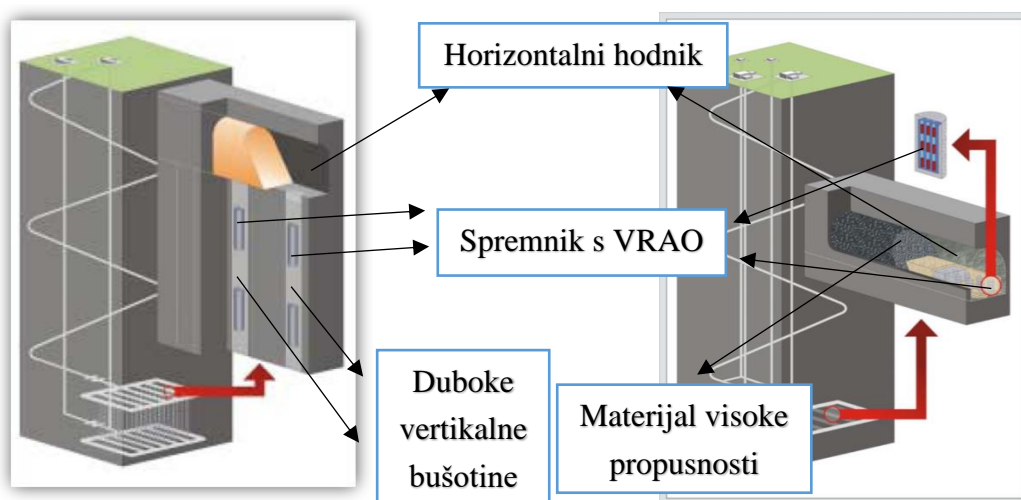
Slika 2-4. Aksijalno odlaganje (lijevo), aksijalno postavljen superkontejner (desno) (Baldwin et al., 2008).



Slika 2-5. Asijalno postavljen superkon., betonska ispuna hodnika (lijevo), aksijalno postavljen superkon. veliki promjer (desno) (Baldwin et al., 2008).



Slika 2-6. Galerije, odlaganje čeličnih višenamjenskih kontejnera (lijevo), odlaganje kanistara ili kanistara s betonskom oblogom (desno) (Baldwin et al., 2008).



Slika 2-7. Odlaganje u duboke vertikalne bušotine (lijevo), hidraulički kavez (desno) (Baldwin et al., 2008).

## 2.3 Odlagalište KBS – 3

KBS -3 je model konačnog odlagališta iskorištenog nuklearnog goriva u kojemu:

- je ING oklopljeno u spremnike koji su ne korozivni, nepropusni i visoke nosivosti,
- spremnici su odloženi u čvrste stijene na dubinama 400 – 700 m,
- spremnici su obavijeni ispunom koja onemogućava protjecanje vode,
- šupljine u stijenskoj masi potrebne za odlaganje ispunjavaju se i zatvaraju.

Svo iskorišteno nuklearno gorivo iz Švedskog nuklearnog programa koje se neće ponovno koristiti, mora biti zatvoreno, skladišteno i na kraju odloženo u KBS – 3 odlagalište. Nakon zatvaranja KBS – 3 odlagalište mora sadržavati nuklearno gorivo i odijeliti ga od okoliša. Ukoliko dođe do propuštanja spremnika, konačno odlagalište mora onemogućiti ili usporiti disperziju radioaktivnih tvari (Morén, 2010). U KBS – 3 odlagalištu, spremnici s ING mogu biti odloženi horizontalno u tunelima (KBS – 3H) ili vertikalno u bušotinama (KBS – 3V).

### 2.3.1 Predviđeni dizajn

Projekt KBS – 3 odlagališta u skladu je s međunarodnim sporazumima, državnim zakonima i propisima kao i inženjerske barijere te podzemne prostorije. Osim zakonske podloge, tijekom izrade projekta, korišteni su podaci o svojstvima nuklearnog goriva, vremenu poluraspada, a kao najviši prioritet postavljena je sigurnost (zaštita ljudskog zdravlja i okoliša od zračenja, kako za sadašnje, tako i za buduće generacije) te načelo više barijera (pasivna zaštita) i ukapanje na veće dubine ( 400 -700 m) (Morén, 2010).

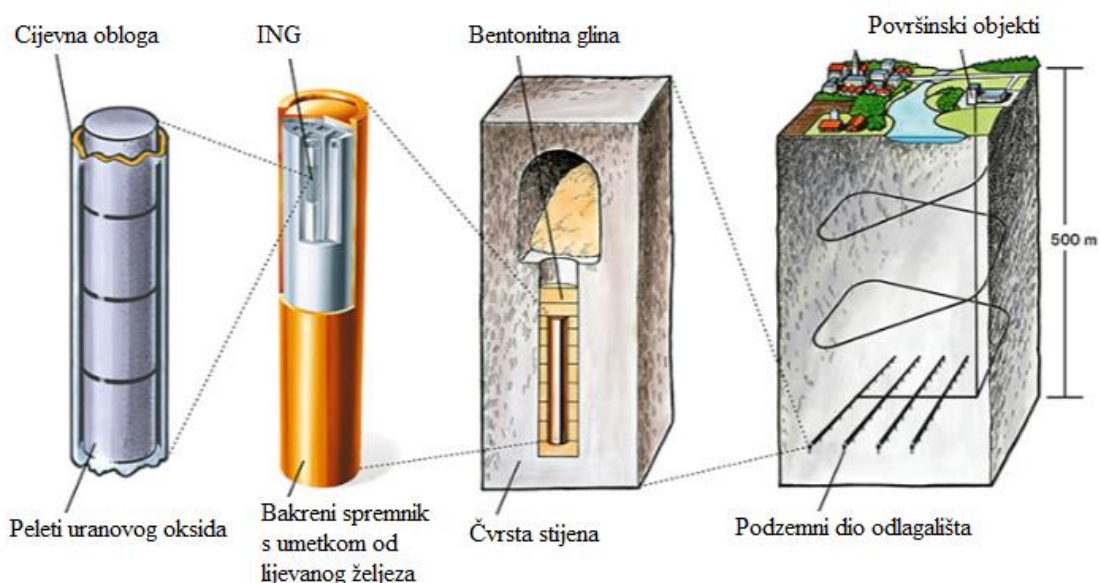
Uloga inženjerskih barijera i podzemnih prostorija da upotrijebi stijensku masu kao prepreku zračenju ostvarena je zadržavanjem iskorištenog goriva i onemogućavanjem disperzije radioaktivnih tvari. Svojstva inženjerskih barijera i podzemnih prostorija, npr. oblik, dimenzije i nosivost omogućiti će namjenu objekta (Morén, 2010).

Pretpostavke dizajna ovisno o funkcijama KBS – 3 odlagališta temelje se na rezultatima procjene dugoročne sigurnosti i identifikaciji brojnih studija baziranih na dizajnu odlagališta. Kako bi odlagalište bilo tehnički izvedivo, svi dijelovi odlagališta moraju pristajati, zajedno tvoriti cjelinu, dizajn jedne komponente može sadržavati pretpostavku za sljedeću. Moguća opterećenja prilikom manipulacije spremnicima pružaju dodatne

vrijednosti parametara koji se koriste prilikom dimenzioniranja spremnika. Kako bi sigurnost prilikom rukovanja bila zajamčena, spremnici moraju zadržati nepropusnost prilikom svih očekivanih opterećenja, a kako bi se smanjile doze zračenja kojima se izlaže osoblje, poželjno je da su spremnici pripremljeni za odlaganje i da se izbjegava njihovo vađenje (Morén, 2010).

### 2.3.2 Tehničke karakteristike odlagališta KBS – 3V

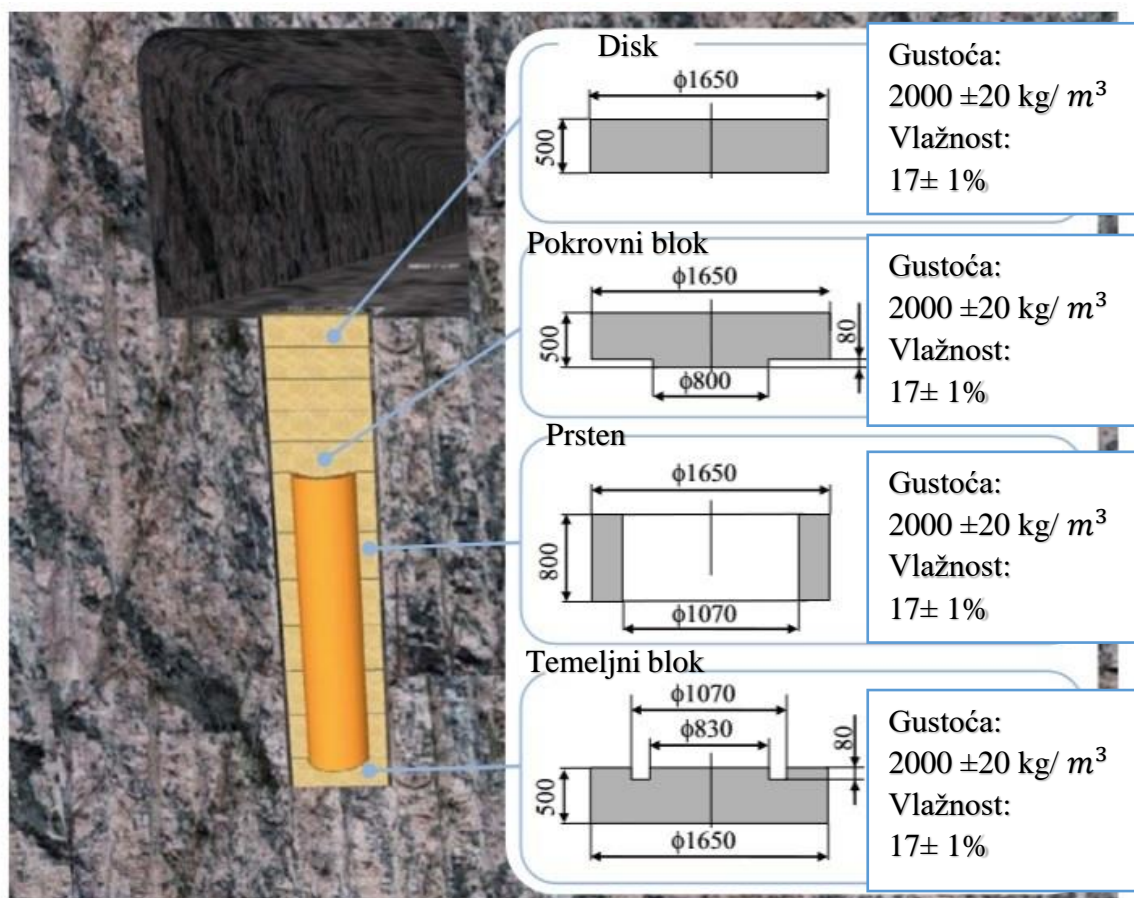
Na slici 2-8. prikazane su inženjerske barijere ugrađene u odlagalište. Vidljiv je način izolacije istrošenog nuklearnog goriva od okoliša. Sustav zapreka zračenju je sljedeći: cijevna obloga unutar bakrenog spremnika → bakreni spremnik → brtveni sloj (bentonitna glina) → sloj kompaktne, čvrste stijene 400 – 700 m debljine.



Slika 2-8. Prikaz modela odlagališta KBS – 3V (Morén, 2010).

Presjek vertikalne bušotine (slika 2-9.) pokazuje poziciju bakrenog spremnika unutar bušotine, raspored blokova ispune, njihove dimenzije i parametre materijala (gustoća, vlažnost). Blokovi prešane bentonitne gline postavljeni su određenim redom, na dno bušotine postavlja se tzv. temeljni blok na koji direktno dolazi bakreni spremnik. Spremnik je obavijen prstenima istog materijala do gornjeg ruba, gdje naliježe pokrovni blok na kojeg se nastavljaju prešani diskovi. Sustav prešanih komponenti bentonitne gline služi kao brtveni

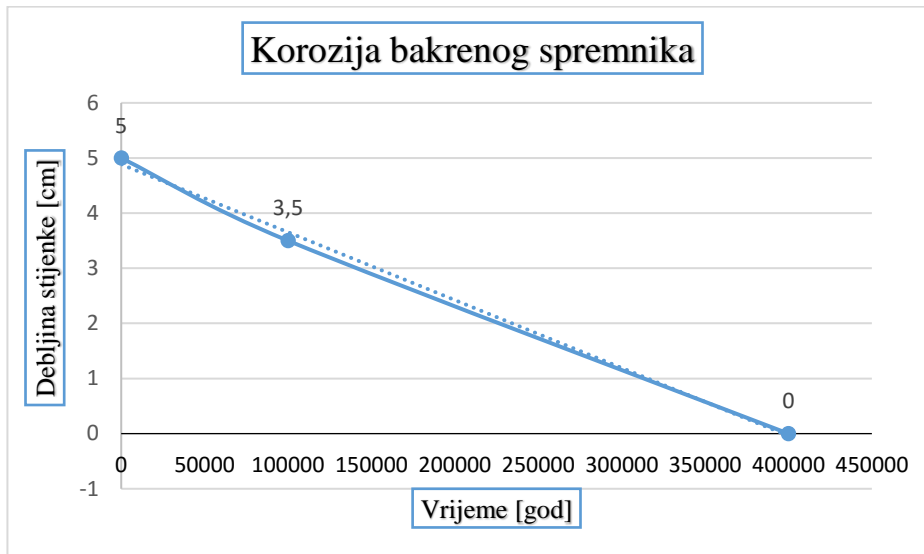
sloj. Zbog izuzetnih svojstava nepropusnosti nakon hidratizacije izabrana je bentonitna glina, više o glini u poglavlju 3.



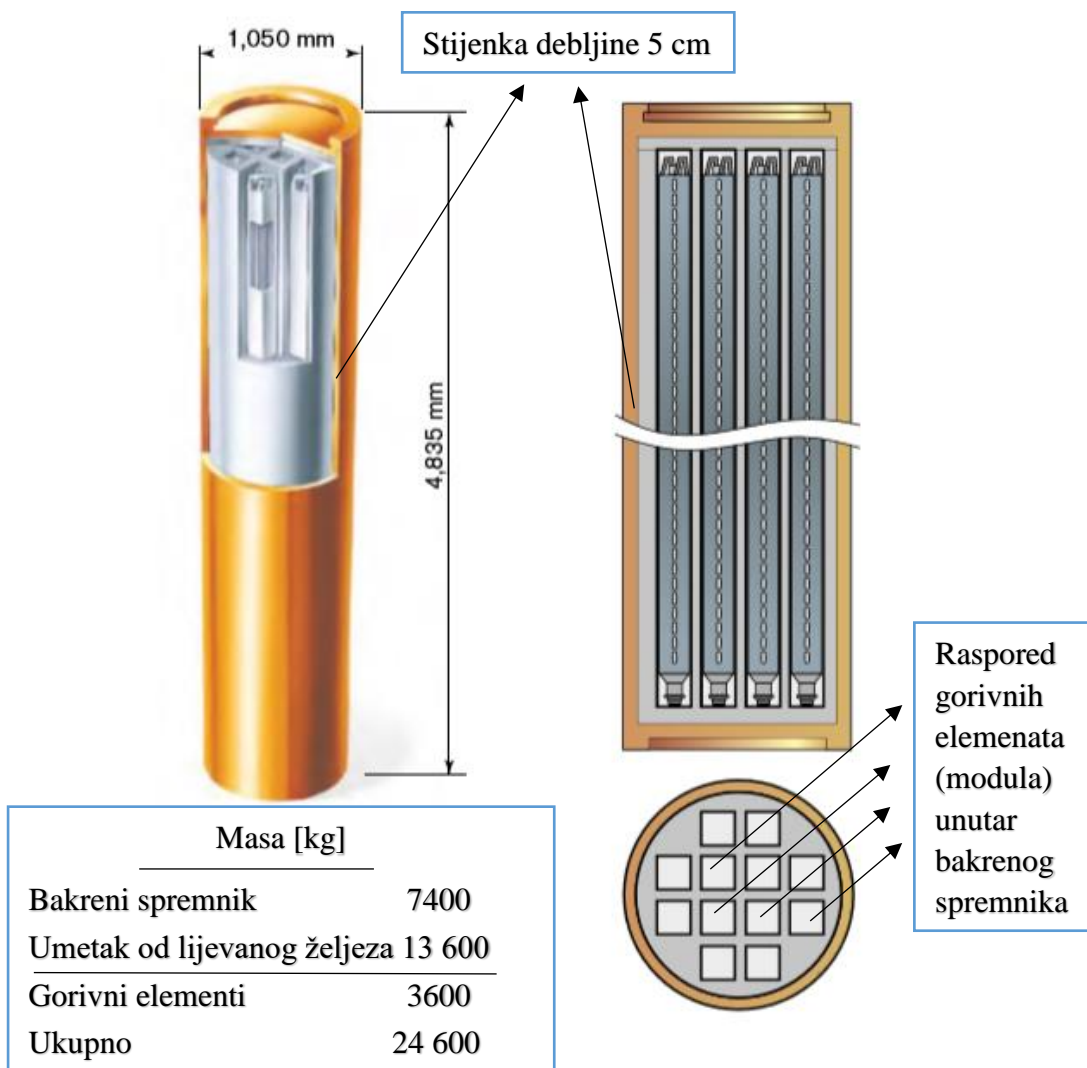
Slika 2-9. Presjek vertikalne bušotine, dimenzije slojeva ispune (Eriksson, 2014).

Bakreni spremnici visine su 4,8 m, promjera 1 m, a u svaki bakreni spremnik odlaže se 12 iskorištenih gorivnih elemenata prema rasporedu sa slike 2–11. Najvažniji kriterij postavljen od regulatora je garancija nepropusnosti spremnika od 0,1 do 1 milijun godina. Glavni cilj kriterija nepropusnosti je sprečavanje procesa korozije tokom tog perioda, što nalaže procjenu učinka korozije na spremnik. Bakar je termodinamički potpuno stabilan u čistoj vodi, ali podliježe vrlo sporoj koroziji u podzemnim vodama gdje se nalaze određene koncentracije sumpora i kisika, najkorozivnijih agenasa. S obzirom da će kisik u podzemnoj vodi biti potrošen u raznim procesima oksidacije ili od strane mikroorganizama neposredno nakon odlaganja, elementarni sumpor je glavna prijetnja bakrenom spremniku u podzemlju. Eksperimentalno i teorijskim modelima predviđena korozija 50 milimetarskog bakrenog spremnika u 100 000 godina je 15 mm. Smatra se da će spremnik potpuno korodirati za 400 000 godina (Pusch, 2008) (slika 2-10.), iz slike je vidljivo da je korozija spremnika nešto

brža u početku, nakon čega usporava, tj. ne može se reći da korozija napreduje linearno tijekom vremena.



Slika 2-10. Korozija bakrenog spremnika.



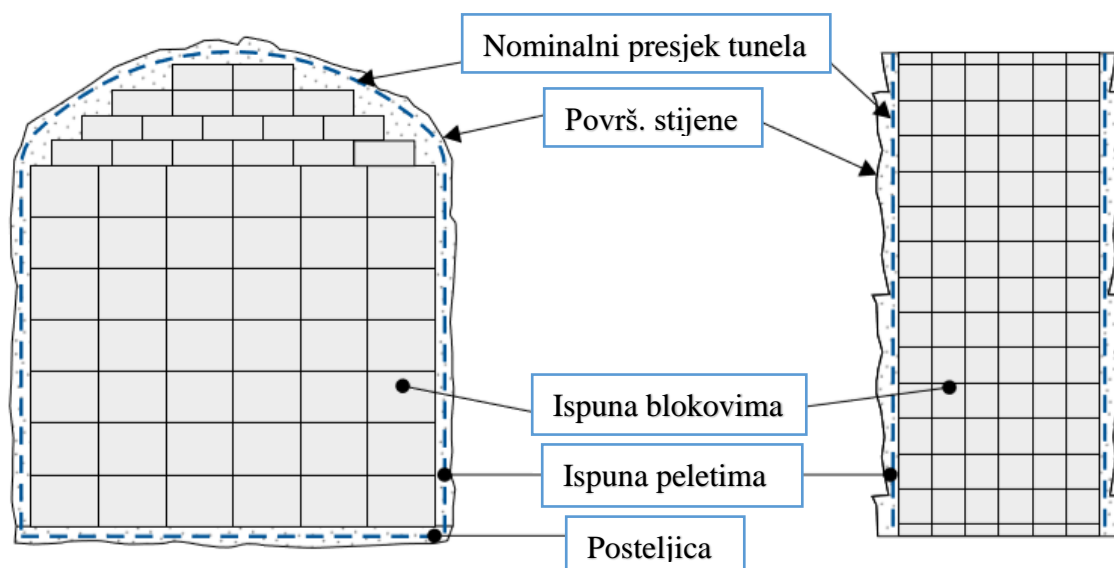
Slika 2-11. Izgled bakrenog spremnika za ING (Morén, 2010).

Ispuna podzemnih prostorija (hodnika i galerija) predviđena je kockama prešanog bentonita i bentonitnim peletima. Geometrijski raspored vidljiv je na slici 2-13.



Slika 2-12. Prešana bentonitna glina oblika kocke (lijevo), bentonitni peleti (desno) (Morén, 2010).

KBS – 3 model predviđa korištenje prefabriciranih blokova kao ispunu gotovo cijelog volumena tunela. Bentonitni peleti (slika 2-12.) postavljaju se na dno tunela netom prije postavljanja blokova kako bi osigurali ravnu površinu za polaganje blokova. Peleti se, također, koriste kao ispunu u prostoru između blokova i zidova tunela kako bi blokove zaštitili od direktnog dotoka vode. (Arvidsson et al., 2015).



Slika 2 – 13. Shematski prikaz geometrijskog rasporeda ispune tunela. (Arvidsson et al., 2015).



### 3. Inženjerske barijere u odlagalištima visokoradioaktivnog otpada i iskorištenog nuklearnog goriva

Inženjerske barijere prisutne su u odlagalištima radioaktivnog otpada kako bi se osigurala bolja izolacija te zaštita ljudi i biosfere od opasnog ionizirajućeg zračenja radioaktivnog otpada. Funkcija brtvljenja osigurava se uglavnom upotrebom cementa ili gline (bentonita). Kontrola kvalitete gline provodi se postupcima uobičajenim za ispitivanje materijala koji se ugrađuju u brtvene barijere bilo kojeg inženjerskog zahvata. Jedina je razlika u kriterijima koje glina mora zadovoljiti. Propisana svojstva glina ovise također i o vrsti matične stijene (Domitrović et al., 2012).

U dubokim geološkim odlagalištima između spremnika i matične stijene nalaze se tamponski slojevi, njihova zadaća je dvojaka:

- a) zaštita spremnika u kojima se nalazi radioaktivni otpad,
- b) sprječavanje prodora opasnih tvari u okoliš ukoliko dođe do oštećenja zaštitnog spremnika.

Materijal koji se koristi kao tampon mora biti dovoljno plastičan kako bi zaštitio spremnik od mogućih pomaka u matičnoj stijeni te dovoljno krut (zbijen) da osigura stabilan oslonac spremniku sprječavajući njegove pomake u podzemnom otvoru. Također, mora imati mogućnost samozacjeljivanja. U tamponu ne smiju biti prisutni porni kanali koji bi omogućili advektivni tok otopljenih tvari i plinova kroz njega (Domitrović et al., 2012).

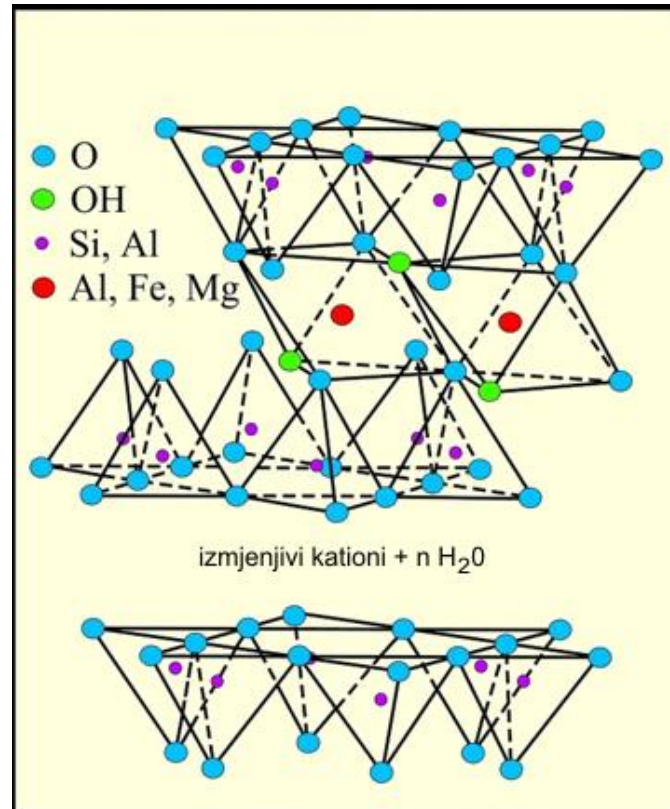
#### 3.1 Bentonitna glina – materijal i svojstva

Bentonitne gline danas imaju široku primjenu. Kako se radi o prirodnom materijalu, neškodljivom za okoliš, u posljednjih se nekoliko desetljeća učestalije primjenjuje u sve većim količinama. U primjeni se posebno ističu natrijske bentonitne gline zbog velike sposobnosti bubrenja. U kontaktu s vodom pa čak i uslijed povećane vlažnosti zraka, natrijske bentonitne gline bubre i do 15 puta u odnosu na dehidratizirano stanje. Bubrenjem se popunjavaju njezine pore osiguravajući time vrlo malu hidrauličku i plinsku provodljivost, odnosno omogućavajući njezinu primjenu kao brtvene barijere u različitim inženjerskim zahvatima. Zbog navedenih svojstava, bentonitne gline se kao brtvena komponenta upotrebljavaju i u glinenim geosintetičkim barijerama (Domitrović, 2012). Dominantni sastojak bentonita su minerali glina smektitne grupe, ali bentonit može

sadržavati i male količine drugih minerala glina, najčešće ilita. Najzastupljeniji mineral glina iz smektitne grupe koji se javlja u bentonitima je montmorillonit (Domitrović et al., 2012). Smektitni imaju sićušne čestice slojevite (listićaste) strukture, zbog malog jediničnog naboja javlja se relativno veliki kapacitet ionske izmjene, a specifična površina čestica doseže i do  $800 \text{ m}^2/\text{g}$ . Mogu imati vrlo veliku bubrivost te nisku hidrauličku vodljivost ( $k < 10^{-12} \text{ m/s}$ ). Zbog navedenih svojstava smektita, njihov veći postotak ujedno znači i veću kvalitetu bentonita.

Jedinični naboj i koloidalna veličina čestica imaju za posljedicu da ova skupina minerala ima veliki afinitet prema molekulama vode. Rado ih vežu, pa tako mogu i višestruko povećati svoj volumen što ima značajnu ulogu na mehanička svojstva uključujući čvrstoću, deformabilnost i hidrauličku provodljivost bentonitnih glina (Domitrović, 2012).

Montmorilloniti se sastoje od silikatnih slojeva 2:1 (dvije tetraedrijske mreže i između njih jedna oktaedrijska mreža) koji su negativno nabijeni zbog djelomičnih izmjena  $\text{Si}^{4+}$  s  $\text{Al}^{3+}$  u tetraedrijskim i  $\text{Al}^{3+}$  s  $\text{Mg}^{2+}$  u oktaedrijskim pozicijama. Negativni naboj kompenziraju uglavnom međuslojni kationi  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  i  $\text{Na}^+$  (slika 3-1.) (Blažević, 2007.).



Slika 3-1. Struktura montmorillonita (Blažević, 2007.).

Zbog navedenih svojstava bentonitna glina planira se primijeniti kao tampon između spremnika ING/RAO i kompaktne stijene, odnosno matične stijene na lokaciji odlagališta. Bentonit korišten u eksperimentalnom dijelu rada je kemijski aktivirani natrij bentonit *Saline seal 100* poljske tvrtke Cetco (slika 3-2., 3-3., 3-4.).



Slika 3-2. Ambalažno pakiranje Saline seal 100 gline.



Slika 3-3. Detalj pakiranja, masa i proizvođač.



Slika 3-4. Saline seal 100 u petrijevoj zdjelici.

### 3.2 Ispitivanja bentonitne gline kao moguće inženjerske barijere

Kako bi se odabrale pogodne komponente za primjenu u tamponskim slojevima i slojevima zasipa potrebno je prethodno provođenje niza laboratorijskih ispitivanja koja se provode prema standardnim procedurama. Sav materijal koji će se ugrađivati u odlagalištu mora zadovoljiti određene kriterije za ugradnju u tamponske slojeve i slojeve ispune. Prije odabira materijala za ugradnju i same ugradnje materijal se podvrgava kontroli kvalitete.

Tražene vrijednosti ovise o potrebnim projektiranim vrijednostima minimalne izolacijske sposobnosti različitih materijala koji se upotrebljavaju kao tamponski ili materijali ispune. Pod pojmom izolacijske sposobnosti materijala podrazumijevaju se propisane vrijednosti hidrauličke i plinske propusnosti, kapaciteta difuzije te njegova reološka ponašanja. Sve te veličine su u funkcijskoj zavisnosti s granulometrijskim sastavom, mineraloškim sastavom kao i ukupnom gustoćom, odnosno zbijenošću materijala. Obzirom da se brtveni slojevi nalaze u nesaturiranim uvjetima danas su istraživanja navedenih hidromehaničkih svojstava i ponašanja usmjerena prema ispitivanjima uz poznate uvjete usisnih naprezanja (Domitrović et al., 2012).

Svojstva materijala koja se kontroliraju prije ugradnje su približno ista kao i za ostale vrste inženjerskih barijera. Razlika može postojati u kriterijima koje je potrebno zadovoljiti, odnosno traženim vrijednostima pojedinih parametara. S obzirom na dugo vremensko razdoblje kroz koje je potrebno osigurati djelovanje brtvenih sustava posebnu pažnju je potrebno posvetiti trajnosti bentonita (Domitrović et al., 2012).

Prilikom ugradnje materijala u tamponske slojeve i slojeve ispune, svojstva ovise o vrsti matične stijene. U solima kao matičnoj stijeni preporuča se uporaba kalcijevih bentonita, a u ostalim stijenama, gdje nema mogućnosti kontakta s otopinama soli, preporuča se korištenje natrijskih bentonita. U svrhu osiguranja dugotrajne stabilnosti inženjerskih barijera i po zatvaranju odlagališta, preporuča se da bentonit, ugrađen u tampon, zadovoljava određene kriterije. Kriteriji koje mora zadovoljiti tamponski sloj bentonita prikazani su u tablici 3-1.

Tablica 3-1. Tražena svojstva bentonita za primjenu u tamponu. Vrijednosti za Na/Ca-bentonit (Domitrović et al., 2012).

Ispitivanje	Tražena srednja vrijednost-Na-bentonit	Granične vrijednosti po ispitivanju-Na-bentonit	Tražena srednja vrijednost-Ca-bentonit	Granične vrijednosti po ispitivanju-Ca-bentonit
Vlažnost-deklarirana	$\leq 13\%$	max. 15%	$\leq 13\%$	max. 15%
Indeks slob. bubrenja	$\geq 20$ ml/2 g	min. 15 ml/2 g	$\geq 25$ ml/2 g	min. 10 ml/2 g
Kapacitet upijanja	$\geq 200\%$	min 150%	$\geq 200\%$	min 150%
Granice tečenja	$\geq 250\%$	min. 200%	$\geq 80\%$	min. 60%
Hidraulička propusnost	$\leq 10^{-12}$ m/s	max. $10^{-11}$ m/s	$\leq 10^{-12}$ m/s	max. $10^{-11}$ m/s
Udio smektita	$\geq 75\%$	min. 65%	$\geq 75\%$	min. 65%
Kapacitet ionske izmjene	$\geq 75$ meq/100 g	min. 60 meq/100 g	$\geq 60$ meq/100 g	min. 50 meq/100 g
Tlak bubrenja	$\geq 2$ MPa		$\geq 2$ MPa	
Toplinska vodljivost	$\geq 1,0$ W/Km	min. 1,0 W/Km	$\geq 1,0$ W/Km	min. 0,9 W/Km
Organski ugljik	$< 1\%$	-	$< 1\%$	-
Sumpor u sulfidima	$\leq 0,5\%$	-	$\leq 0,5\%$	-
Ukupni sumpor	$\leq 1\%$	-	$\leq 1\%$	-

### 3.2.1 Ispitivanje bentonita u svrhu kontrole kvalitete

Metode ispitivanja koje se koriste za kontrolu kvalitete bentonitnih glina može se podijeliti u dvije grupe (Domitrović et al., 2012):

- a) Brzi i jednostavni postupci: vlažnost, indeks bubrenja, granice plastičnosti, kapacitet upijanja vode.
- b) Zahtijevnija ispitivanja: analiza kemijskog sastava, analiza mineraloškog sastava, tlak bubrenja, hidraulička propusnost.

Jednostavna ispitivanja koja daju dragocjene informacije o traženim svojstvima bentonita su:

- Indeks slobodnog bubrenja

Uzorak se priprema sušenjem na 60°C, nakon čega se prosije na situ od 75µm. Od prosijenog uzorka odvažu se 2g koja se zatim postepeno usipavaju u menzuru napunjenu demineraliziranom vodom. Brzina usipavanja je približno 0,1g/ 10 min. Nakon zadnjeg usipavanja uzorka, te proteka vremena od 16 sati očitava se volumen uzorka, koji predstavlja vrijednost slobodnog bubrenja izraženu u ml/ 2g (Domitrović et al., 2012).

- Kapacitet upijanja vode

Uzorak se pripremi sušenjem na 60 °C. Od tako pripremljenog uzorka odvažu se 0,2 g uzorka koji se zatim usipaju na stakleni filter uređaja za određivanje kapaciteta upijanja vode. Volumen upijene vode očitava se na bireti tijekom iduća 24 sata. Promatra se volumen upijene vode u odnosu na početni suhi volumen uzorka (Domitrović et al., 2012).

- Hidraulička propusnost

Određivanje protoka svodi se na mjerenje protoka vode, tj. promjene volumena uz određene uvjete tlaka. Zbog svojih prednosti, ovo je najčešće korištena metoda za mjerenje propusnosti. Uzorak je okružen fleksibilnom membranom koja prijanja uz njegove stijenke uslijed djelovanja ćelijskog tlaka, čime je spriječeno stvaranje kanala za prolazak vode na rubovima uzorka. Primjenom povratnog tlaka lako se osigurava zasićenost uzorka čak i kod vrlo slabopropusnih tala (Domitrović et al., 2012).

- Atterbergove granice

Za kontrolu kvalitete najčešće se koriste granica tečenja i granica plastičnosti. Nakon što se uzorak homogenizira i pripremi u plastičnom stanju, na dijelu uzorka se pomoću konusnog penetrometra određuje granice tečenja. Na drugom dijelu uzorka određuje se granica plastičnosti valjanjem valjčića. Granica plastičnosti predstavlja vlažnost kod koje valjčići promjera 3 mm pucaju daljnjim valjanjem (Domitrović et al., 2012).

#### 4. Laboratorijsko ispitivanje prešanog bentonita

Kao što je spomenuto u poglavlju 3.2, uobičajena praksa ispitivanja bentonitne gline za upotrebu u brtvenim slojevima su ispitivanja vlažnosti, indeksa bubrenja, granica plastičnosti i kapaciteta upijanja vode. Za potrebe ovog rada pripremani su uzorci prešane bentonitne gline. Glina je prešana u valjčiće kako bi se simuliralo zatvaranje odlagališne bušotine KBS – 3V modela. Pošto su vrijednosti parametara vlažnosti, indeksa bubrenja, granica plastičnosti te kapaciteta upijanja vode otprije već dobro poznati za spomenuti materijal, na prešanim uzorcima ispitana je jednoosna tlačna čvrstoća, propusnost (permeabilnost) i poroznost. Navedena ispitivanja odabrana su zbog simulacije ponašanja gline u spomenutom odlagalištu te predviđanje nedostataka modela.

##### 4.1 Priprema uzoraka

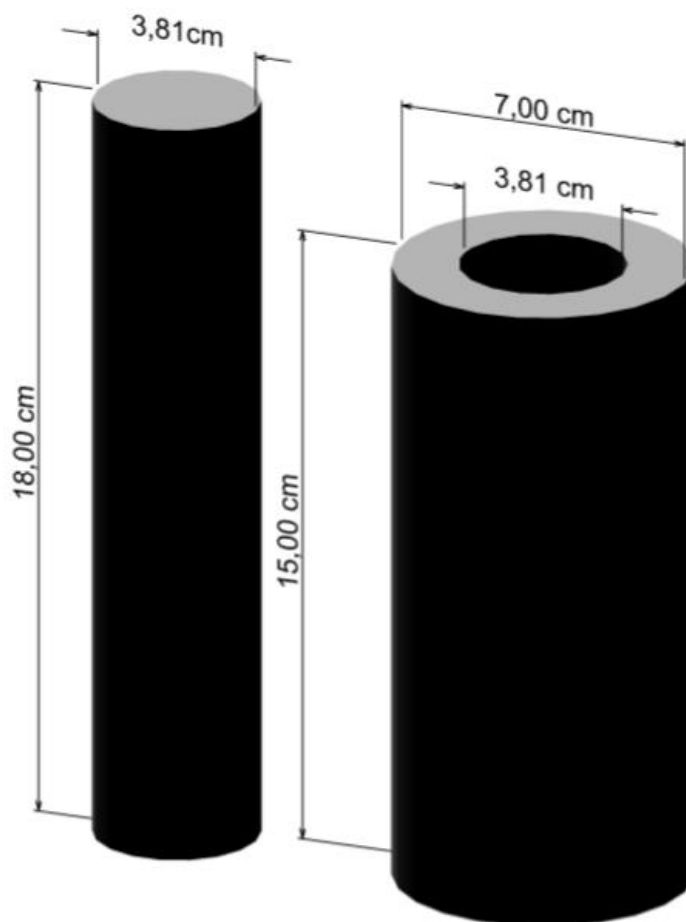
Kako bi bilo moguće izraditi valjčiće prešane bentonitne gline, započelo se s izradom kalupa nakon čega slijedi prešanje hidrauličkom prešom i vađenje uzoraka iz kalupa. Prilikom pripreme uzoraka pojavilo se je nekoliko problema. Izrada kalupa i prešanje bentonitne gline biti će detaljnije objašnjeni u poglavljima 4.1.1., odnosno 4.1.2. Problemi i rješenja obrađeni su u poglavlju 4.1.3.

###### 4.1.1 Izrada kalupa

Visina kalupa (H) i promjer kalupa (d) projektirani su uz ograničenja dimenzija obzirom na veličine uzoraka. Konačni proizvod prešanja morao je zadovoljavati uvjete za naknadna ispitivanja (mjerjenje jednoosni tlačne čvrstoće, permeabilnosti, poroznosti). Kako bismo uzorak mogli podvrgnuti ispitivanju jednoosne tlačne čvrstoće omjer visine prema promjeru morao je biti 2,0-2,5:1, također uređaj za mjerjenje permeabilnosti i uređaj za mjerjenje poroznosti prihvaćaju uzorke maksimalnog promjera 1,5“, što preračunato u centimetre iznosi 3,81 cm. Izrađena su dva kalupa u dvije različite izvedbe. Kalup 1 prikazan je na slici 4-2., kalup 2 na slici 4-5., a na slikama 4-1., 4-3. i 4-4. 3D modeli.

Oba kalupa izrađena su od strane Hidrauluka-centar j.d.o.o. kovinotokarskim tehnikama. Kalup 1 izrađen je od inox materijala, dok je kalup 2 izdubljen u čeliku visoke čvrstoće. Izrađen je 3D model u programu Power InRoads (slika 4-1.) nakon čega započinje i sama izrada.





Slika 4-1. Kalup 1 – 3D model.

Kalup se sastoji od dva dijela, cilindra i plašta. Zadaća plašta (slika 4-1. desno) je onemogućavanje bočnog širenja prilikom prešanja bentonitne gline cilindrom (slika 4-1. lijevo). Željene dimenzije kalupa su sljedeće:

- visina cilindra,  $H_1 = 18,00$  cm,
- promjer cilindra,  $d_1 = 3,81$  cm,
- vanjski promjer plašta,  $D = 7,0$  cm
- unutarnji promjer plašta,  $d_2 = 3,81$  cm
- visina plašta,  $H_2 = 15,00$  cm.

Tijekom izrade kalupa dolazi do tehničkih problema koji za posljedicu imaju promjenu vrijednosti  $d_1$  i  $d_2$ . Promjer  $d_2$  iznosio je 3,91 cm, posljedično istu vrijednost poprima i  $d_1$ . Kalup 1 (slika 4-2) nije zadovoljio kriterije postavljene za izradu uzoraka na kojima će se ispitivati permeabilnost i poroznost, no zadovoljio je kriterije za pripremu uzoraka na kojima će biti ispitivana jednoosna tlačna čvrstoća.



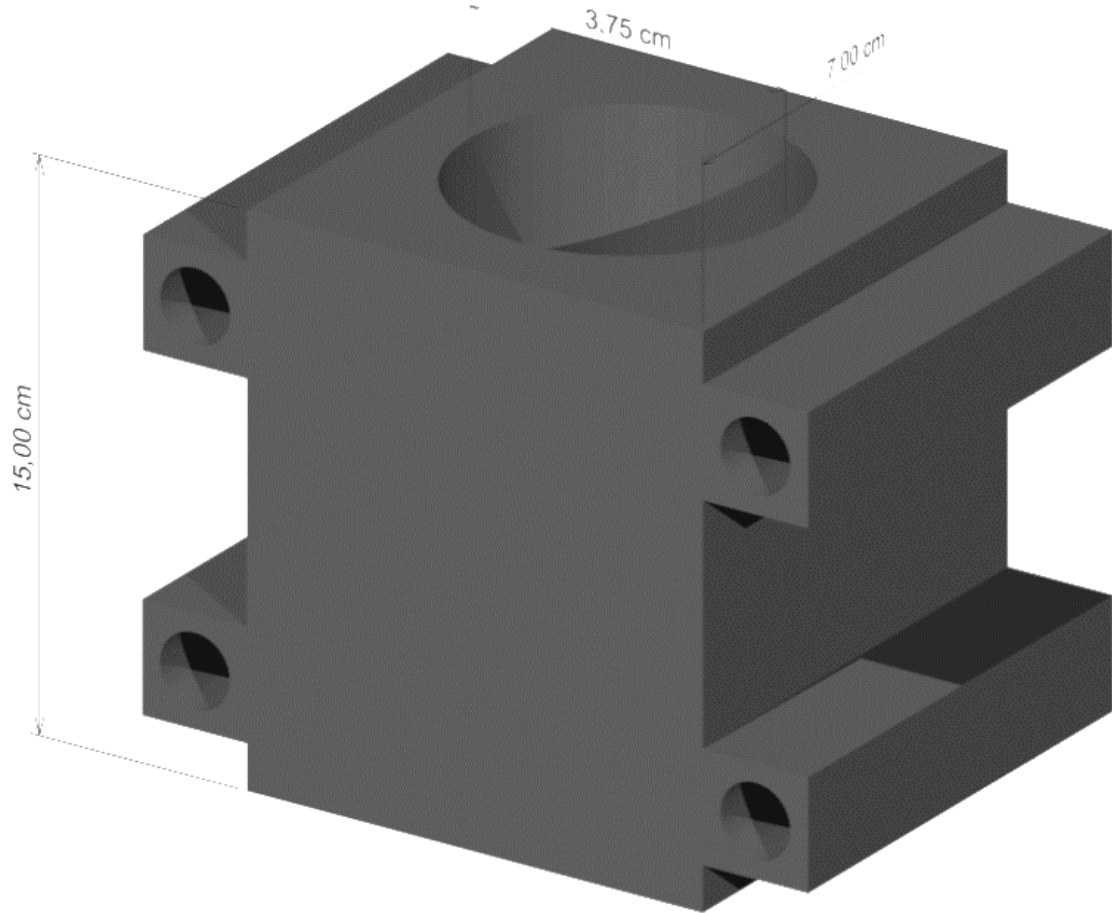
Slika 4-2. Kalup 1, cilindar (lijevo) i plašt (desno).

Nakon pripreme za ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće pojavljuje se potreba za novim kalupom koji će biti odgovarajućih dimenzija kako bi se provela mjerenja permeabilnosti i poroznosti. Kalup 2 zamišljen je u dva simetrična dijela koja se spajaju vijcima odgovarajuće čvrstoće. Unutarnjeg promjera dimenzija odgovarajućih za pripremu uzoraka koji imaju maksimalan promjer od 3,81 cm. Prije izrade kalupa pomoću računalnog programa Power InRoads izrađen je 3D model (slika 4-3., slika 4-4.).

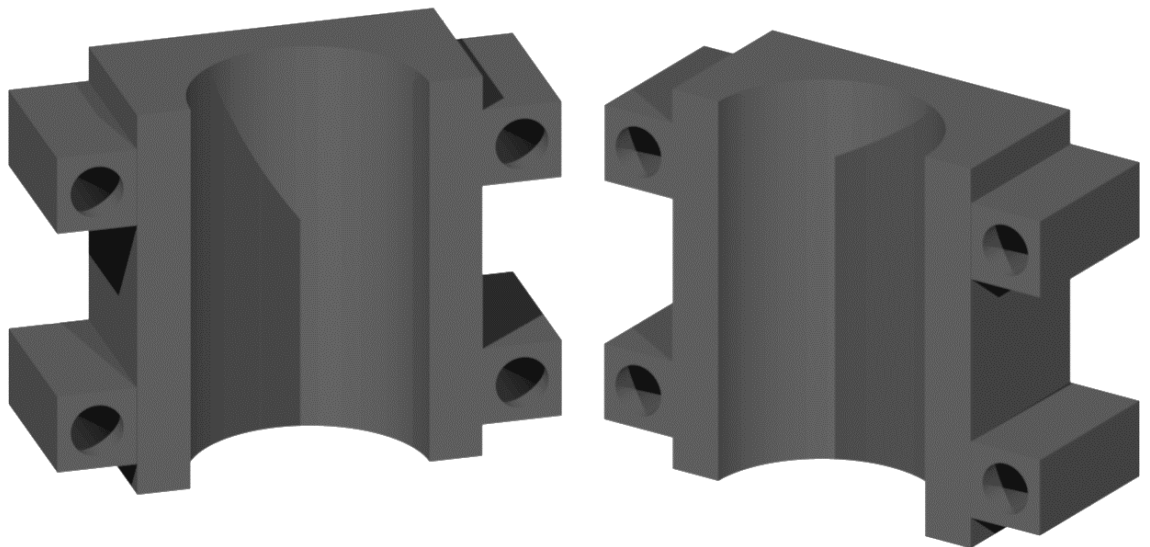
Dimenzije kalupa:

- visina:  $H = 15$  cm,
- širina:  $l = 7$  cm,
- unutarnji promjer:  $d = 3,75$  cm.

Za potrebe prešanja gline izrađen je i novi cilindar promjera  $d_2 = 3,73$  cm.

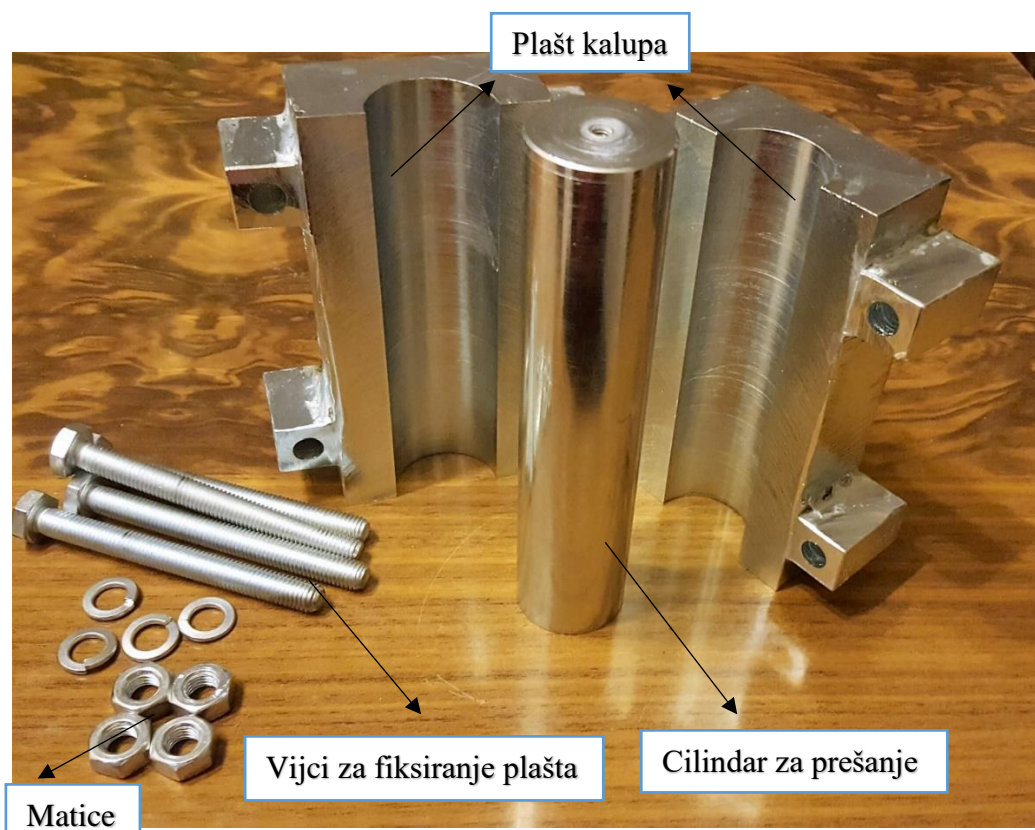


Slika 4-3. 3D model Kalup 2 zatvoren.



Slika 4-4. 3D model Kalup 2 otvoren.

Kalup 2 izrađen je prema postavljenim zahtjevima također od strane Hidraulika – centar j.d.o.o. kovinotokarskim tehnikama. Na slici 4-5. vidimo kalup netom nakon izrade i cinčanja kako bi se kalup zaštitio od korozije.



Slika 4-5. Kalup 2, nakon izrade.

#### 4.1.2 Prešanje bentonitne gline

Prešanje bentonitne gline odvijalo se u nekoliko faza i na dvije lokacije. Kao što je već ranije spomenuto započelo se sa prešanjem gline u svrhu ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće prilikom čega je korišten kalup 1. Uzorci za ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće pripremani su u tvrtki Geokon – Zagreb d.d., dok su ostali uzorci pripremani u Laboratoriju za mehaniku stijena RGNf-a.

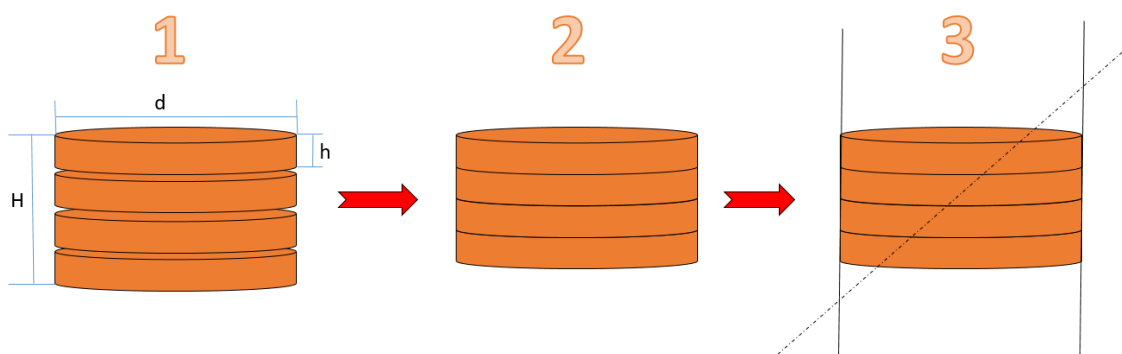
#### 4.1.2.1 Prešanje bentonitne gline u svrhu ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće

Glina je prešana u jednom sloju, nakon čega u četiri sloja (četiri diska). Tablica 4-1. prikazuje primijenjenu silu, ostvareni tlak, broj slojeva i dimenzije dobivenih uzoraka. Zbog tehničkih problema, tj. oštećenja kalupa, uzorci označeni zvijezdicom (\*) nisu dobiveni, ispitivanja su provedena na dobivenim uzorcima.

Tablica 4-1. Uzorci za ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće.

Br. uzorka	Br. slojeva	$d_{sr}$ [mm]	A [mm <sup>2</sup> ]	Sila prešanja [kN]	Tlak prešanja [MPa]	$H_{sr}$ [mm]
1	1	39,15	1203,19	50	41,56	89,47
2	4	39,10	1200,12	50	41,66	80,79
3	1	39,13	1201,96	200	166,40	75,15
4	1	39,13	1201,96	100	83,20	79,85
5*	4	-	-	100	-	-
6*	4	-	-	200	-	-

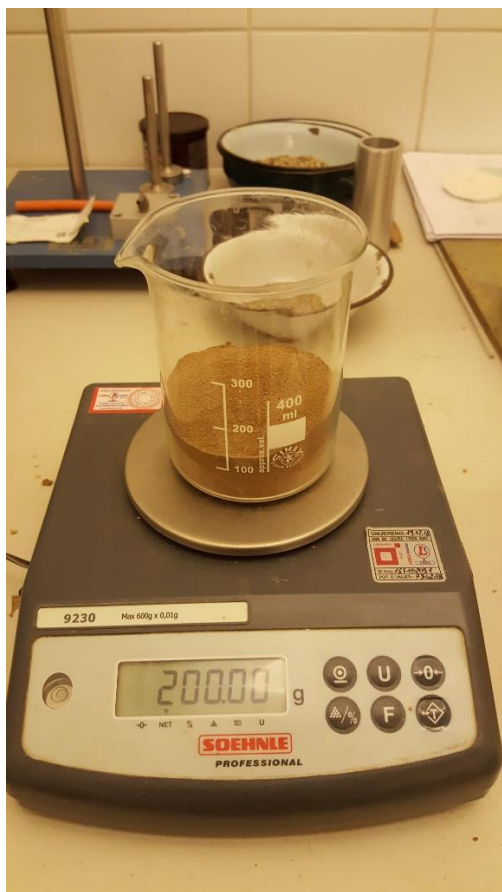
(\*) uzorci nisu uspješno prešani, stoga na njima nisu provedena ispitivanja.



Slika 4-6. Shematski prikaz rasporeda slojeva prilikom prešanja bentonitne gline u četiri sloja (1,2), pojednostavljena očekivana ploha sloma (3).

Uzorak broj 1 pripremljen je u jednom sloju, upotrebljena je sila od 50 kN na promjeru  $d_1$  kalupa 1, te je ostvaren tlak od približno 42 MPa. Masa uzorka prije prešanja iznosi 200,00 g (slika 4-7.), a nakon 199,59 g (slika 4-8.) što upućuje na gubitak od 0,41 g uzorka. Srednja visina i srednji promjer vidljivi su u tablici 4-1.

a)



b)



c)



Slika 4-7. a) masa uzorka 1, b) masa uzorka 1 nakon prešanja, c) proces prešanja.

Uzorak broj 2 pripreman je u 4 sloja. prešan je sloj po sloj, ukupna masa ulaznog uzorka je također 200,00 g. Prešani su slojevi po 50,00 g uzorka u četiri navrata. Slika 4-6. shematski prikazuje izgled uzorka i vrlo pojednostavljenu očekivanu plohu sloma. Izlazna masa uzorka iznosila je 199,69 g. Srednja visina i promjer vidljivi su u tablici 4-1. Izgled uzorka 2 i njegova masa prikazani su na slici 4-8.



Slika 4-8. Masa uzorka br. 2 (lijevo), izgled uzorka (desno).

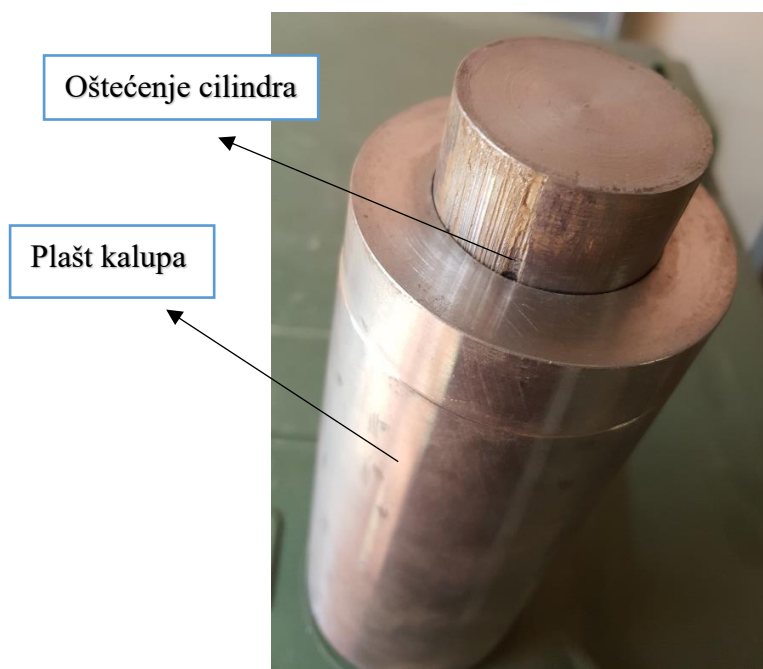
Uzorak br. 3 prešan je na isti način kao i uzorak broj 1, tj. u jednom sloju. Ulazna masa uzorka od 200,00 g usipana je u kalup 1 i površina je zaglađena. Nakon takve pripreme uzorka za prešanje, postepeno je nanošena sila do iznosa od 100 kN. Uzorak je pod opterećenjem od 100 kN držan 5 min, po uzoru na (Eriksson, 2014).

Uzorak broj 4 također je prešan u jednom sloju, ulazna masa uzorka od 200,00 g prešana je silom od 200 kN tijekom 5 minuta. Izlazna masa i izgled prešanog uzorka vidljivi su na slici 4-9. Zbog najveće primjenjene sile visina uzorka 4 je ujedno i najmanja (tablica 4-1.), ujedno i najmanji gubitak mase uzorka ostvaren je u 4. uzorku.



Slika 4-9. Izgled i izlazna masa uzorka 4.

Uzorci 5 i 6 nisu uspješno prešani iz tehničkih razloga. Naime, klip je zaglavio unutar cilindra te napravio brazdu duž unutarnjeg oboda plašta (slika 4-10.). Kalup postaje neupotrebljiv, a cilindar postaje nemoguće izvaditi. Zbog nedovoljnih sredstava nije pristupano izradi novog kalupa istih dimenzija, imajući na umu potrebu izrade kalupa koji će zadovoljiti kriterije ispitivanja permeabilnosti i poroznosti. Kako bi se zadržali isti uvjeti u kojima su uzorci pripremani i kasnije ispitivani, u novom kalupu nisu prešana dodatna 2 uzorka u svrhu ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće.



Slika 4–10. Oštećenje na cilindru kalupa 1.



#### 4.1.2.2 Prešanje bentonitne gline u svrhu ispitivanja permeabilnosti i poroznosti

U svrhu ispitivanja permeabilnosti i poroznosti pripremljeno je 6 uzoraka iste vlažnosti. Rađene su 2 skupine uzoraka, prva skupina (3 uzorka) prešana su u jednom sloju ulazne mase 100,00 g, a druga skupina (3 uzorka) prešana je u 2 sloja, također ulazne mase 100,00 g. Vlažnosti ulaznih uzoraka su jednake (12%). U tablici 4-2. vidljive su dimenzije uzoraka, sile prešanja i ostvareni tlak.

Tablica 4-2. Sila, tlak i dimenzije uzoraka za ispitivanje poroznosti i permeabilnosti.

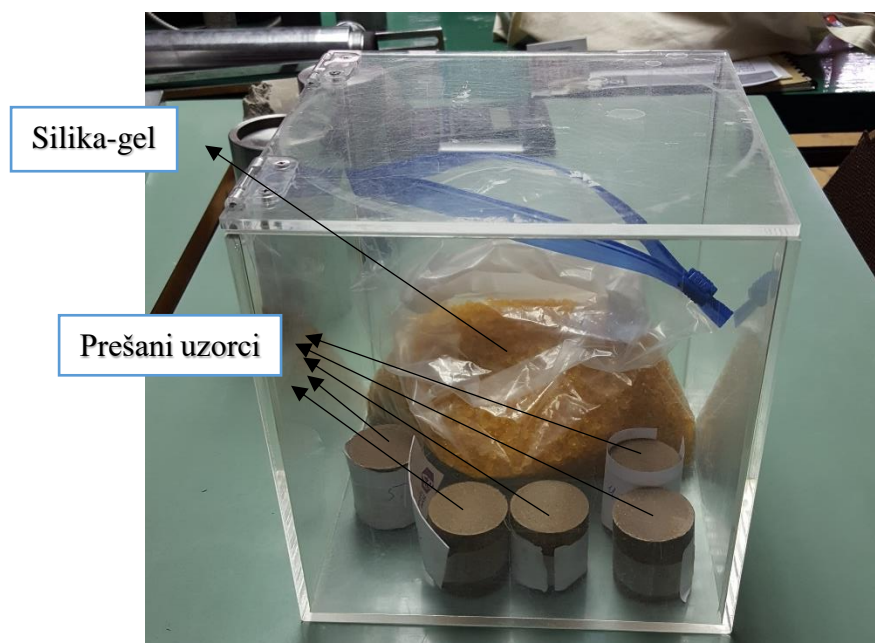
Br.uzorka	br.slojeva	$d_{sr}$ [mm]	$H_{sr}$ [mm]	sila [kN]	tlak [MPa]
<b>7</b>	1	38,10	40,26	113,00	99,17
<b>8</b>	1	37,90	40,03	113,00	100,21
<b>9</b>	1	37,93	40,16	113,00	100,06
<b>10</b>	2	37,93	39,86	113,00	100,06
<b>11</b>	2	37,96	39,90	113,00	99,90
<b>12</b>	2	37,83	39,67	113,00	100,59

Parametri sile, tj. ostvarenog tlaka odabrani su po uzoru na (Eriksson, 2014) gdje je sila na uzorku ostvarivala tlak od 100 MPa. Tako pripremljeni uzorci ulazne mase 100,00 g stavljeni su u plastičnu posudu sa silika-gelom (slika 4-11.). Mase uzoraka mjerene su nekoliko puta, tablica 4-3. prikazuje promjenu masa uzoraka. Mase uzoraka opadaju tijekom boravka u posudi sa silika-gelom što ukazuje na gubitak vlage uslijed isušivanja.

Tablica 4-3. Mase uzoraka za ispitivanje permeabilnosti i poroznosti.

Br.uzorka	Ulazna masa [g]	Masa nakon prešanja [g]	Masa prije ispitivanja permeabilnosti [g]	Masa nakon ispitivanja permeabilnosti [g]
<b>7</b>	100,00	99,42	99,15	98,88
<b>8</b>	100,00	99,42	99,12	99,02
<b>9</b>	100,00	99,41	99,05	98,91
<b>10</b>	2 × 50,00	99,34	98,99	98,86
<b>11</b>	2 × 50,00	99,51	99,12	99,03
<b>12</b>	2 × 50,00	99,32	99,01	98,76

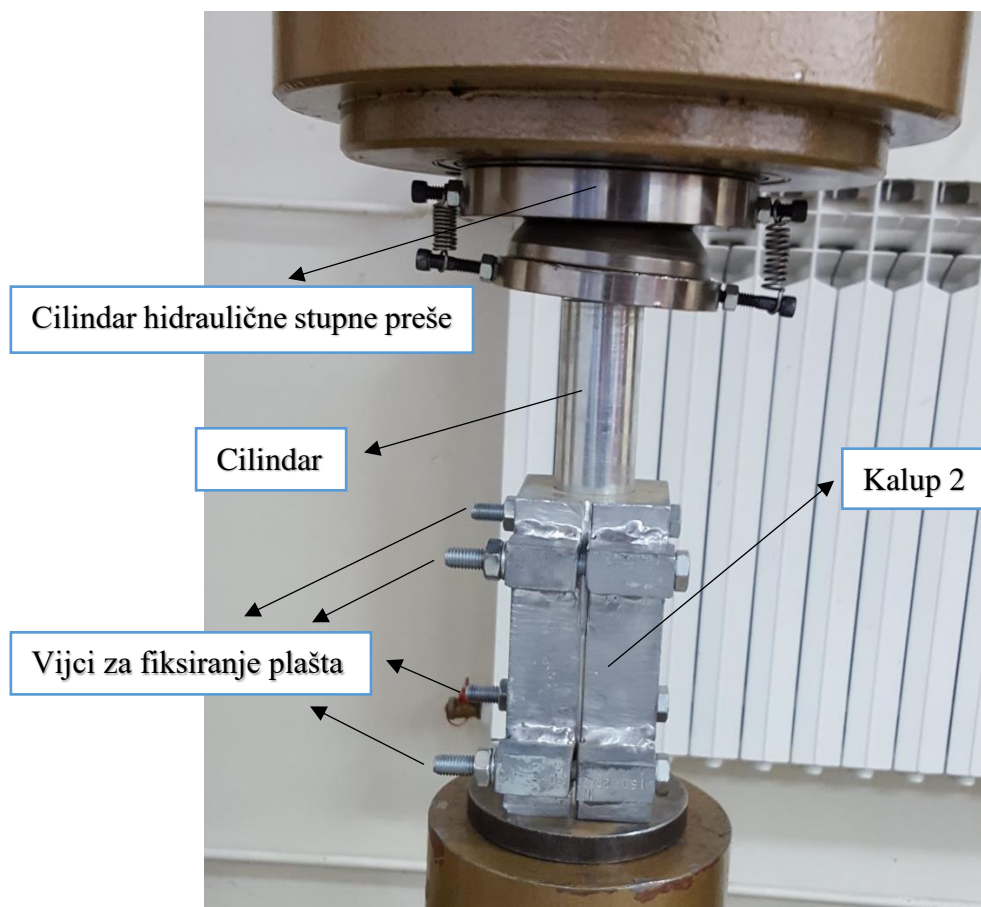
Uzorci 7–9 prešani su u jednom sloju, 100 g uzorka usipano je u kalup 2, površina je zaglađena i kreće se s prešanjem (slika 4-12.). Nanošena je sila do željene vrijednosti, nakon čega se održava opterećenje 5 minuta kako bi se osiguralo izlaženje zraka iz pora uzorka i preslagivanje čestica gline.



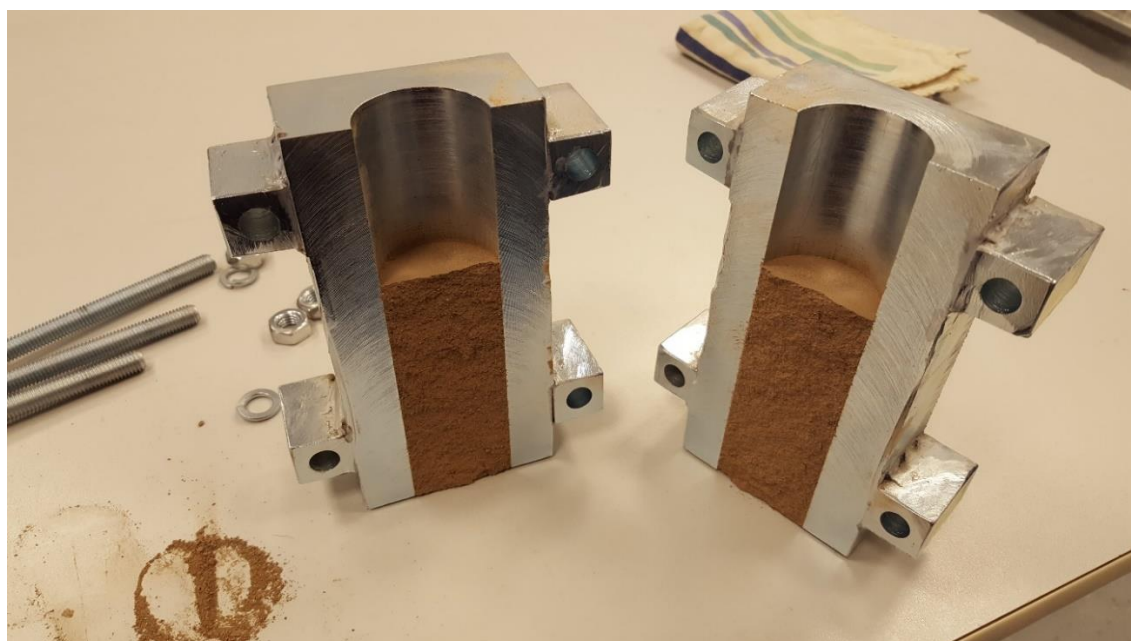
Slika 4-11. Prešani uzorci u posudi sa silika-gelom.

Prešanje u 2 sloja rađeno je na uzorcima 10–12. U kalup 2 usipano je 50 g uzorka koji se preša željenom silom koju održavamo konstantnom u vremenu od 5 minuta, nakon prešanja jednog sloja, na površini prešanog diska napravljene su brazde koristeći odvijač kako bi slojevi prionuli jedan uz drugi. Nakon brazdanja prešanog diska u kalup se usipa ostatak uzorka (preostalih 50 g) i ponavlja proces prešanja. Rezultat ovog načina prešanja je uzorak u 2 sloja, tj. dva diska vrlo dobro međusobno povezana, tretiraju se kao jedan disk u dva sloja. Način prešanja prikazan je na slici 4-12., gdje je vidljivo korištenje izrađenog kalupa, cilindra i hidraulične stupne preše. Kalup na slici ispunjen je sa 100 g bentonitne gline što rezultira izdizanjem cilindra u prikazanoj visini. Nakon uspješno prešanog uzorka poseban izazov predstavljalo je vađenje uzorka iz kalupa. Kalup je zamišljen u dva dijela kako bi se lakše vadio uzorak nakon prešanja, no to se pokazalo kao pogrešna pretpostavka. Prešani uzorci su bili „zalijepljeni“ uz stijenku kalupa uslijed velikog tlaka kojem su bili izloženi i tendencije bočnom širenju koje im je bilo onemogućeno stijenkama kalupa. Prilikom popuštanja vijaka i otvaranja kalupa dolazi do pucanja uzoraka. Uzorci se slamaju

po osi kalupa koja se otvara, vlačna čvrstoća uzoraka nije dovoljna da savlada sile koje „lijepe“ uzorak uz stijenku kalupa (slika 4-13.).

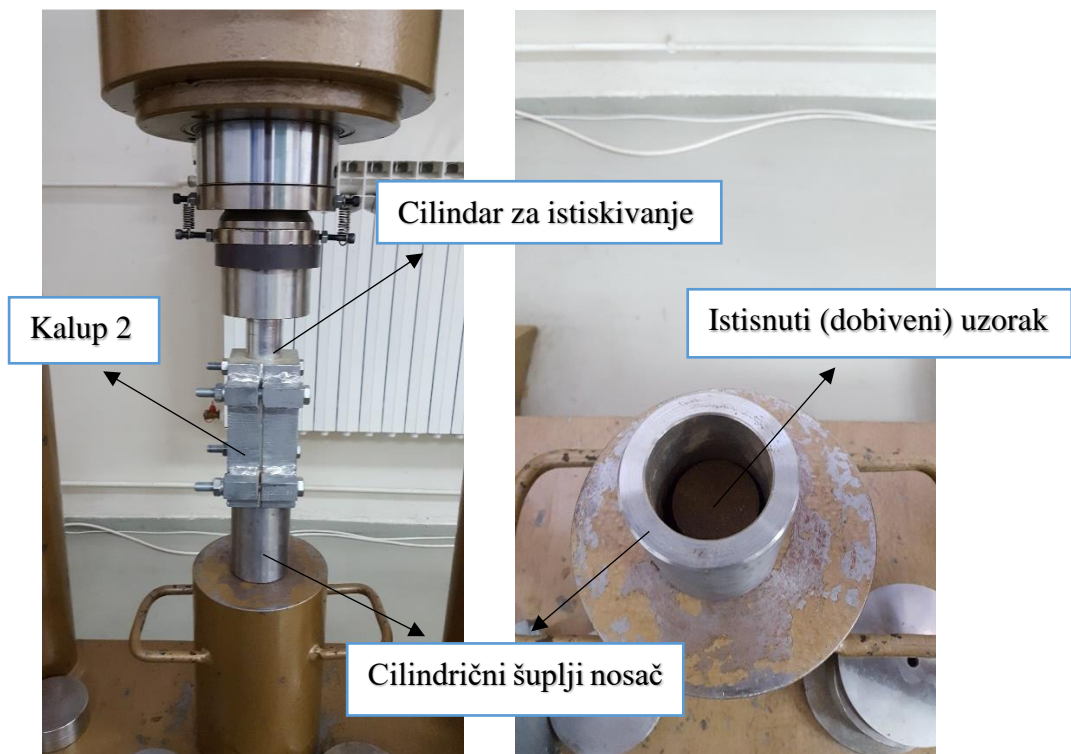


Slika 4-12. Postav opreme prilikom prešanja.



Slika 4-13. Slom uzorka prilikom vađenja iz kalupa otvaranjem.

Kao što je ranije spomenuto, vađenje prešanih uzoraka iz kalupa predstavljalo je poseban problem. Uzorci nisu mogli biti dobiveni u neporemećenom stanju otvaranjem kalupa. Kao rješenje problema nametnula se ideja istiskivanja uzoraka iz kalupa, za potrebe te tehnike bilo je potrebno izraditi cilindrični šuplji nosač na koji je postavljan kalup 2 i iz njega korištenjem hidraulične stupne preše istisnuti uzorci (slika 4-14.).



Slika 4-14. Istiskivanje prešanog uzorka iz kalupa 2.

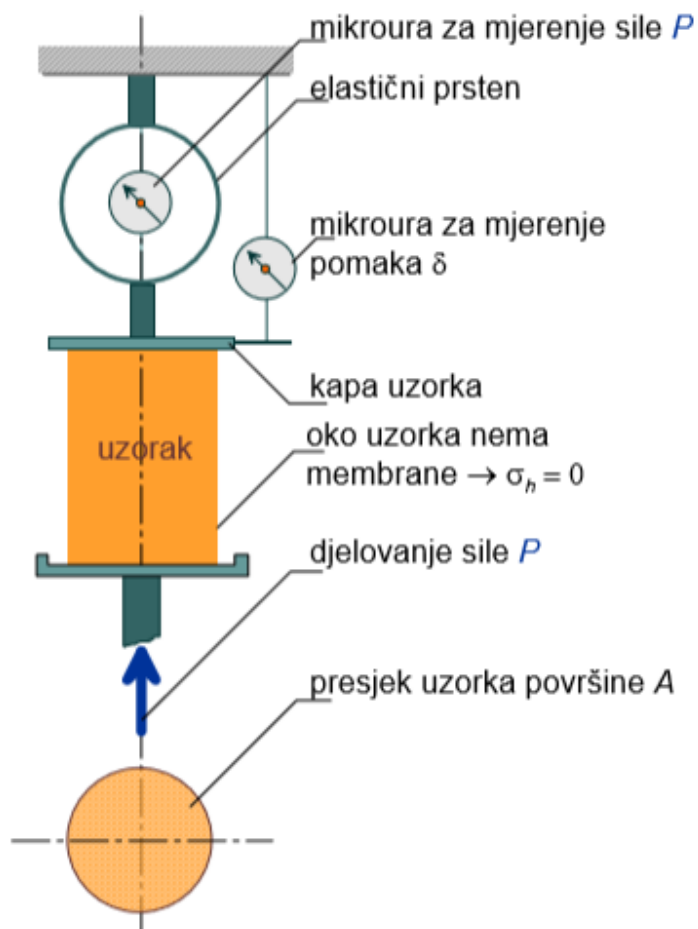
Nakon istiskivanja uzorka iz kalupa, pomicanja cilindra, kalupa i cilindričnog nosača, na postolju ostaje uzorak. Uzorak je potom izmjeran. Mjerena je visina (3 mjerenja), promjer (3 mjerenja) i masa (1 mjerenje). Prikaz dobivenog uzorka i mjerenja promjera vidimo na slici 4-15.



Slika 4-15. Dobiveni uzorak (lijevo), mjerenje dimenzija promjera (desno).

## 4.2 Ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće

Ako se usvoji tumačenje „UU“ pokusa o zadržavanju početnih sfernih napreznja u „svježem“ uzorku tla - da bi rezultati UU pokusa bili upotrebljivi, važno je da se uzorak ispituje u vrlo kratkom roku nakon vađenja iz tla. Kod takvog uzorka još djeluju kapilarne sile preko meniskusa (opni) na vanjskoj površini uzorka, pa porni tlak preuzima vlačna napreznja. Vlačna napreznja u vodi djeluju kao tlačna na čvrste čestice, pa je približno sačuvano sferno napreznje koje je uzorak imao u tlu, a s time i odgovarajuća posmična čvrstoća koja o njemu ovisi. Takav se pokus može izvesti i bez ćelije, pa je, u tom slučaju, sve znatno jednostavnije (i jeftinije). Takav se pokus naziva pokusom jednoosnog posmika i njime se određuje jednoosna tlačna čvrstoća tla,  $q_u$ , koja se može izravno povezati s nedreniranom čvrstoćom tla,  $c_u$  (Kvasnička i Domitrović, 2007). Za potrebe određivanja jednoosne tlačne čvrstoće tla mjerimo vertikalnu silu i pomak uzorka. Shema jednoosnog posmika prikazana je na slici 4-16.



Slika 4-16. Shematski prikaz uređaja za jednoosni posmik (Kvasnička i Domitrović, 2007).

Veličina jednoosne tlačne čvrstoće  $\sigma_{1f}$ , jednaka je osnom naprezanju. Tu veličinu označavamo s  $q_u$ . Nedrenirana kohezija je jednaka radijusu kružnice, tj. polovici nedrenirane čvrstoće (Kvasnička i Domitrović, 2007).

$$c_u = \frac{q_u}{2} \quad (4-1).$$

Pošto je vrlo rijetko moguće uzorke ispitivati netom nakon vađenja, a kod skladištenih uzoraka dolazi do promijene vlažnosti, a time i jednoosne tlačne čvrstoće, taj pokus se u pravilu koristi kao klasifikacijski ili indeksni pokus u mehanici tla i ne smije se rabiti za određivanje čvrstoće.

Kod uzoraka na kojima je izvedeno mjerenje, ne dolazi do promijene vlažnosti, uzorci su ispitivani u istim uvjetima što nam omogućava korištenje jednoosnog posmika. Ne zanima nas prirodno stanje uzorka, tj. čvrstoća pri vlažnosti in situ, nego pokušavamo utvrditi čvrstoću uzoraka pripremljenih u postrojenju za zbrinjavanje RAO. Riječ je o uzorcima kojima se vlažnost održava konstantnom.

Da bi uzorci mogli biti ispitani prema ASTM D 2166-91 standardima moraju zadovoljiti određene uvjete. Promjer uzorka mora biti minimalno 30 mm, a najveća čestica uzorka ne smije biti veća od 1/10 promjera uzorka. Omjer promjera uzorka naprema visini mora biti između 2–2,5:1. Prosječna visina i promjer uzorka moraju biti izmjereni predviđenom opremom, pomična mjerila nisu preporučena za meke uzorke. Potrebno je napraviti minimalno 3 mjerenja visine (120° razlike) i najmanje 3 mjerenja promjera u točkama na četvrt visine uzorka.

Vertikalna deformacija uzorka definira se kao:

$$\varepsilon_v = \Delta L / L_0 \quad [-] \quad (4-2)$$

Gdje:

$\Delta L$  – promjena visine (duljine) uzorka [mm],

$L_0$  – inicijalna visina (duljina) uzorka [mm].

Prosječna površina presjeka definira se kao:

$$A = A_0 / (1 - \varepsilon_v) \quad [\text{mm}^2] \quad (4-3)$$

Gdje:

$A_0$  – inicijalna prosječna površina uzorka, [mm<sup>2</sup>].

Tlačno naprezanje  $\sigma_c$  definira se kao:

$$\sigma_c = (P/A) \text{ [MPa]} \quad (4-4)$$

Gdje:

P – primjenjeno opterećenje [N],

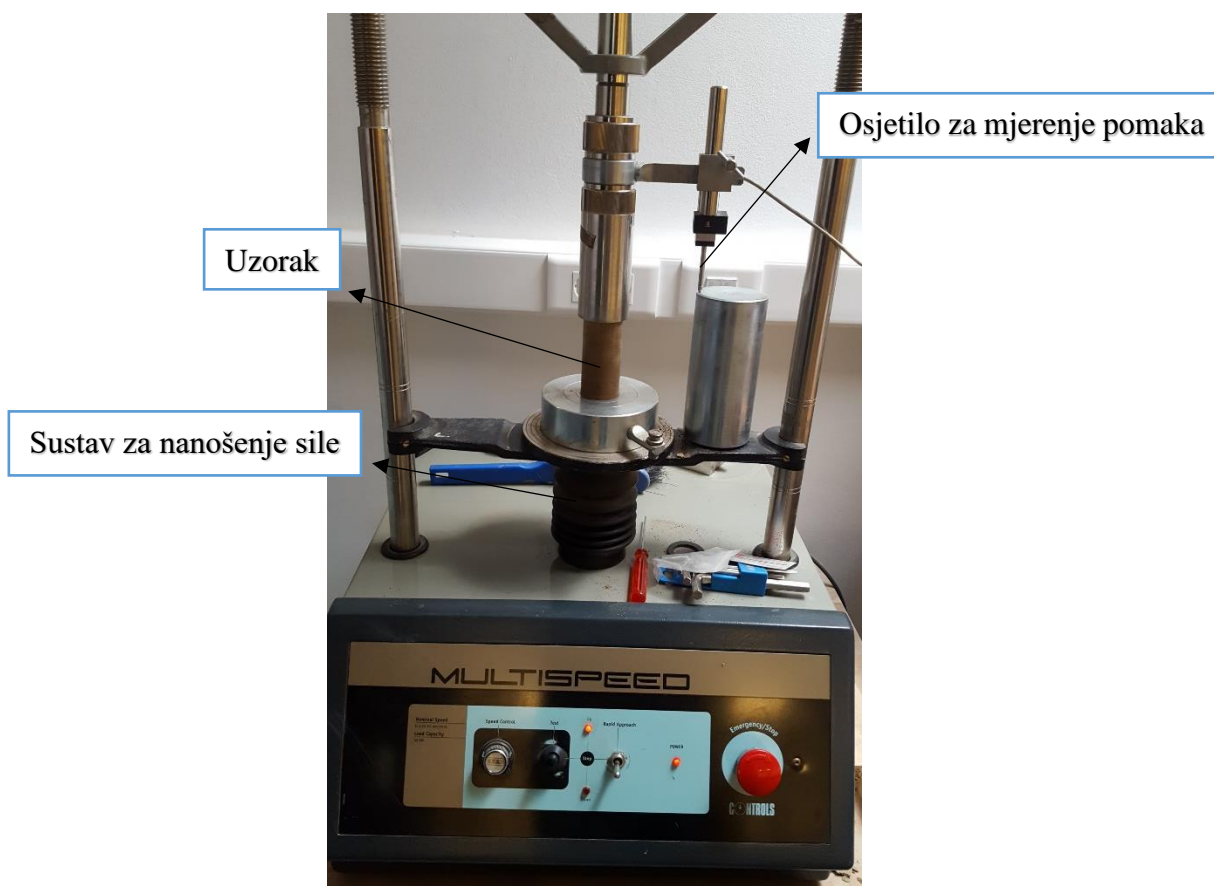
A – prosječna površina presjeka [mm].

#### Uzorak 1

Prema podacima iz tablice 4-1. vidljivo je da uzorak 1 zadovoljava uvjete propisane ASTM standardom. Slika 3-4. prikazuje o kakvom se uzorku radi, te je jasno vidljivo da korištena glina dolazi u obliku praha i neupitno zadovoljava i navedeni zahtjev.

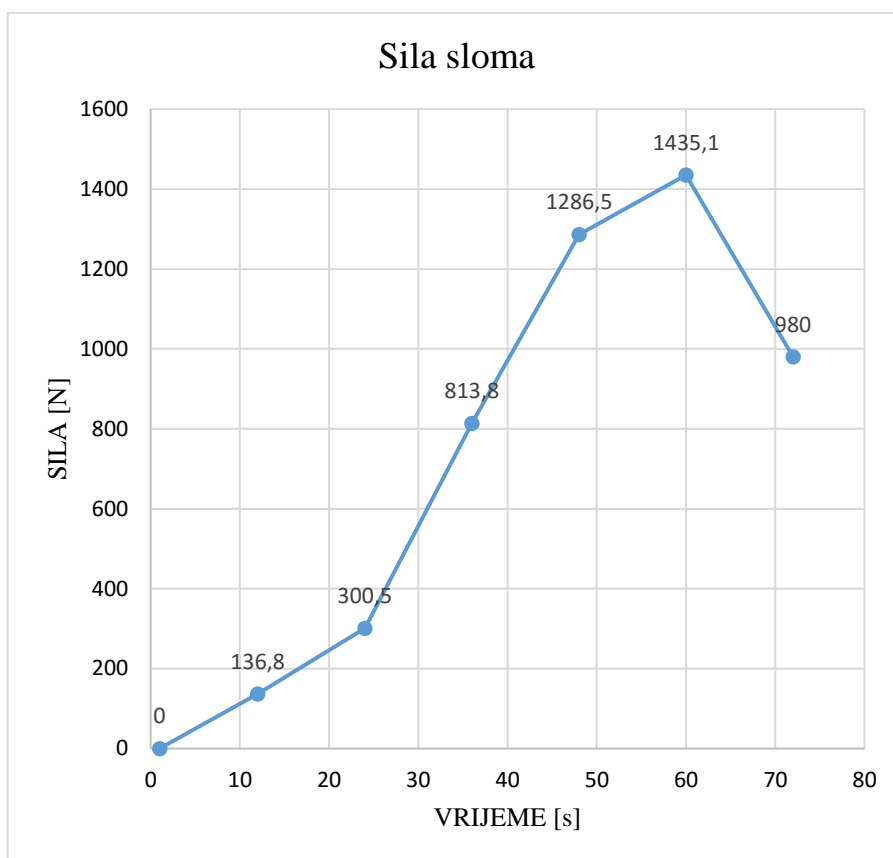
Nakon mjerenja dimenzija i utvrđivanja mase prešlo se na ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće uzorka. Ispitivanje je provedeno na uređaju za određivanje jednoosne tlačne čvrstoće s osjetilom tlaka do 50 kN u tvrtki Geokon - Zagreb d.d.

Na slici 4-17. prikazana je oprema s uzorkom pripremljenim za početak mjerenja. Osjetilo sile nalazi se iznad uzorka, sila se nanosi odozdo, a pomak mjerio pomoću osjetila na desno od uzorka.

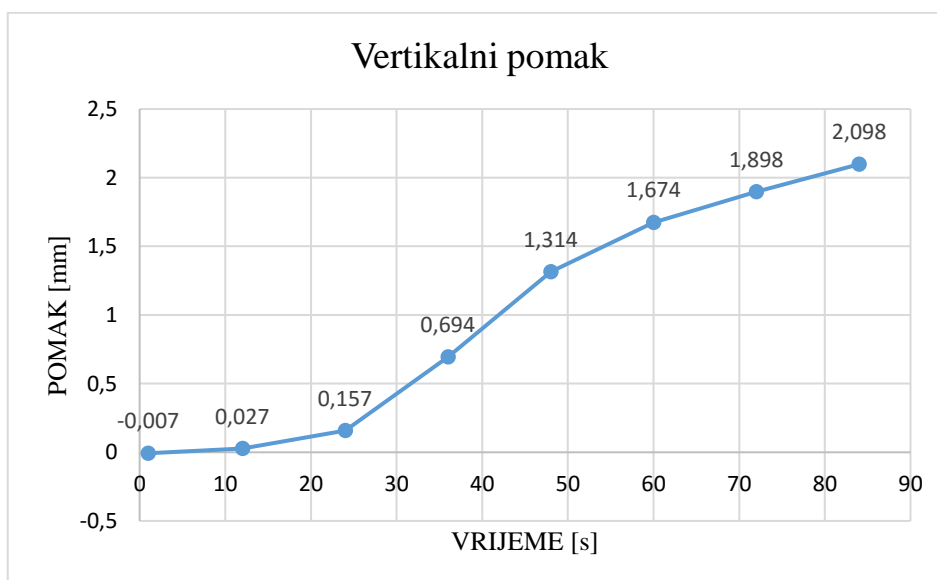


Slika 4-17. Uzorak 1 pripremljen za mjerenje jednoosne tlačne čvrstoće.

Mjerenje je trajalo 144 sekundi (2,4 min), uzorak se slomio pod silom 1435,1 N (slika 4-18.), pri pomaku od 1,674 mm (slika 4-19.).



Slika 4-18. Grafički prikaz sile sloma u vremenu, uzorak 1.



Slika 4-19. Grafički prikaz pomaka u vremenu, uzorak 1.



Iz izmjerenih vrijednosti računamo vertikalnu deformaciju uzorka  $\epsilon_v$ , prosječnu površinu presjeka A i maksimalno naprezanje  $\sigma_c$ .

$$\epsilon_v = 1,674 \text{ mm} / 84,47 \text{ mm} = 0,0187$$

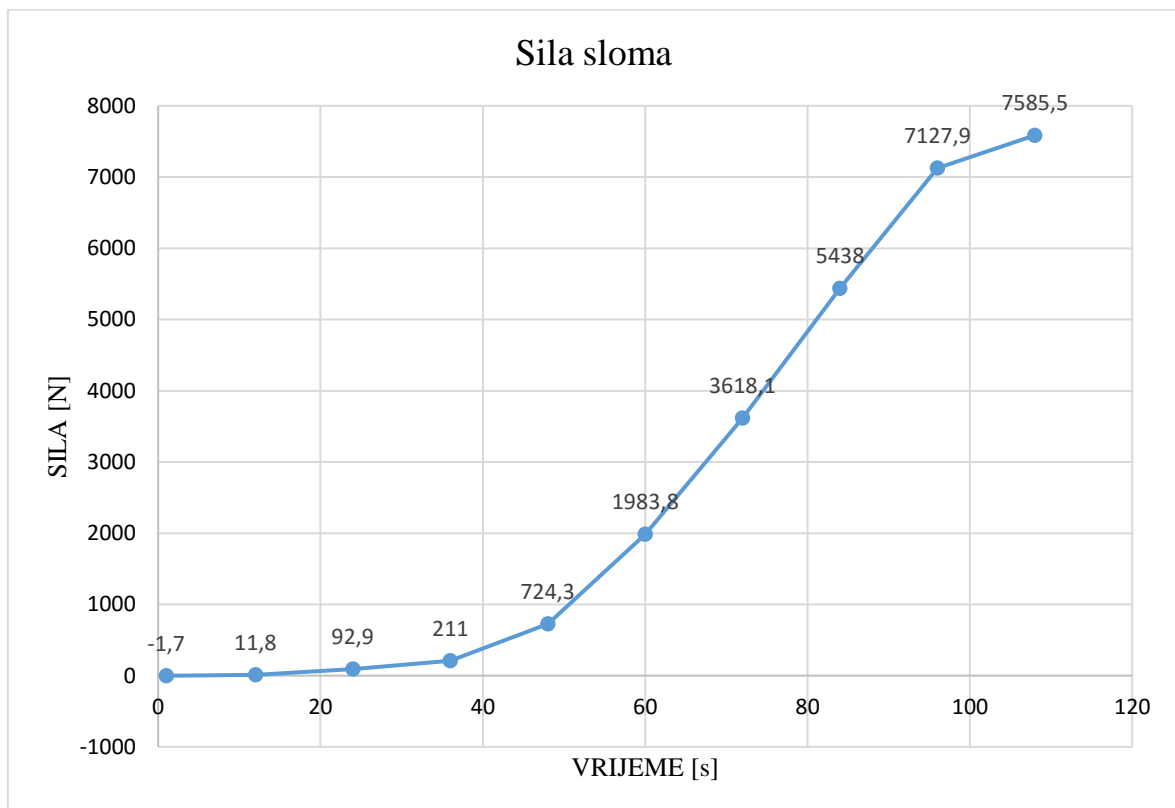
$$A = 1203,19 / (1 - 0,0187) = 1226,13 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_c = 1435,1 \text{ N} / 1226,13 \text{ mm}^2 = 1,17 \text{ N} / \text{mm}^2 = 1,17 \text{ MPa.}$$

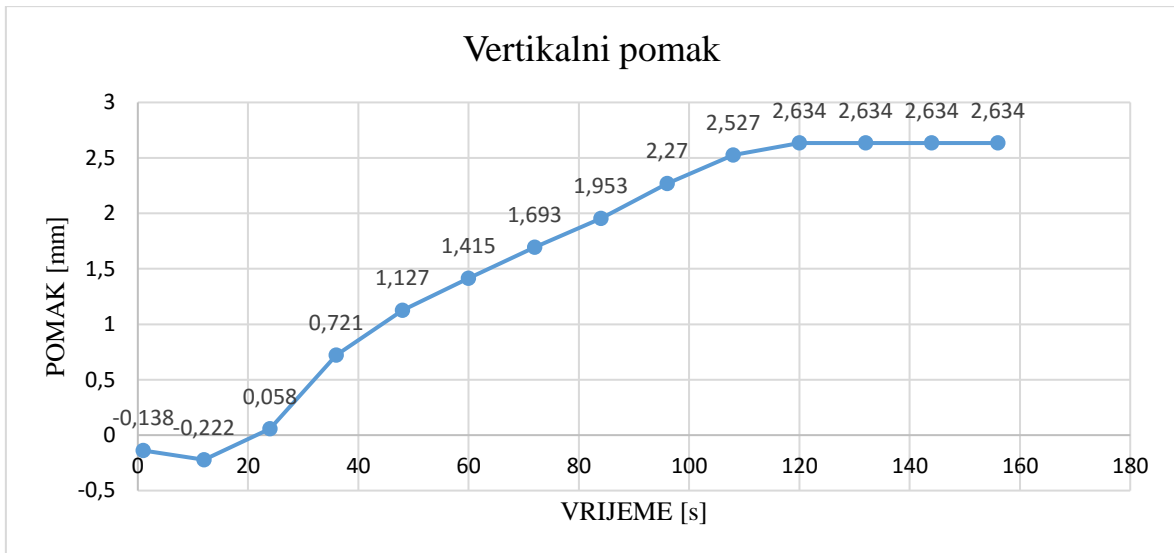
## Uzorak 2

Podaci iz tablice 4-1. pokazuju da uzorak 2 zadovoljava uvjete propisane ASTM standardom, za sve uzorke korišten je isti materijal, stoga i uzorak 2 zadovoljava uvjet maksimalne veličine čestica.

Mjerenje je trajalo 156 sekundi (2,6 min), uzorak se slomio pod silom 7585,5 N (slika 4-20.), pri pomaku od 2,527 mm (slika 4-21.).



Slika 4-20. Grafički prikaz sile sloma u vremenu, uzorak 2.



Slika 4-21. Grafički prikaz pomaka u vremenu, uzorak 2.

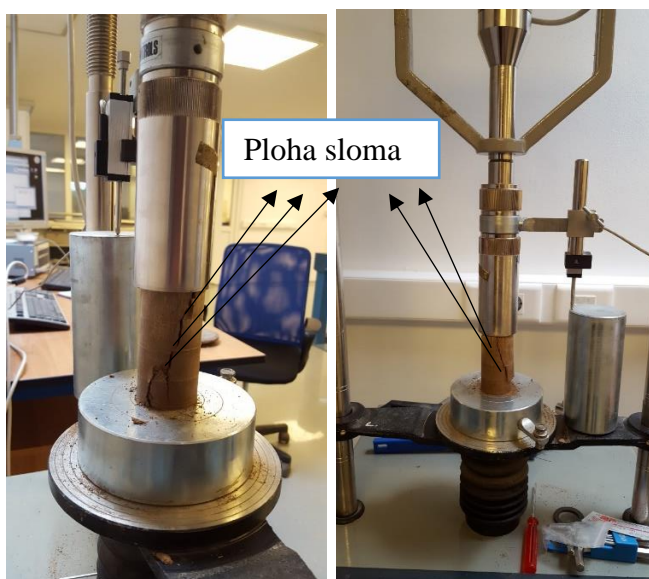
Iz izmjerenih vrijednosti računa se vertikalna deformacija uzorka  $\epsilon_v$ , prosječna površina presjeka  $A$  i maksimalno naprezanje  $\sigma_c$ .

$$\epsilon_v = 2,527 \text{ mm} / 80,79 \text{ mm} = 0,0313$$

$$A = 1200,12 / (1 - 0,0313) = 1238,87 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_c = 7585,5 \text{ N} / 1238,87 \text{ mm}^2 = 6,12 \text{ N/mm}^2 = 6,12 \text{ MPa}.$$

Uzorak se tijekom ispitivanja slomio, izgled sloma kao s uzorka u mehanici stijena naziva se smični slom što je prikazano na slici 4-22. Vidljiva je ploha sloma. Uzorak se ponaša krto, poput stijene uz znatno niže vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće.

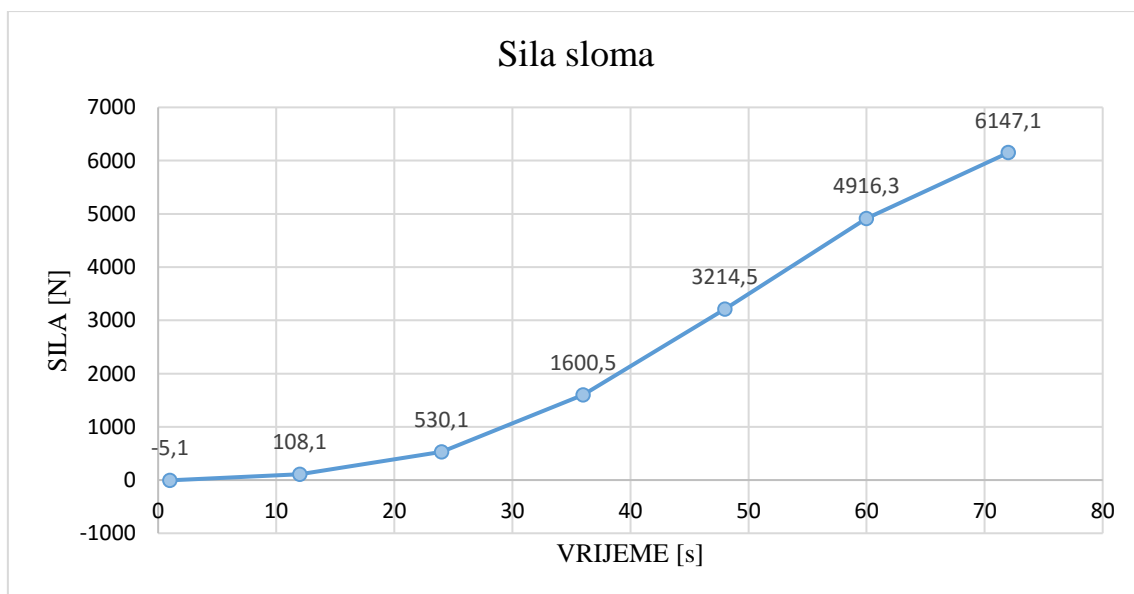


Slika 4-22. Slom uzorka, uzorak 2.

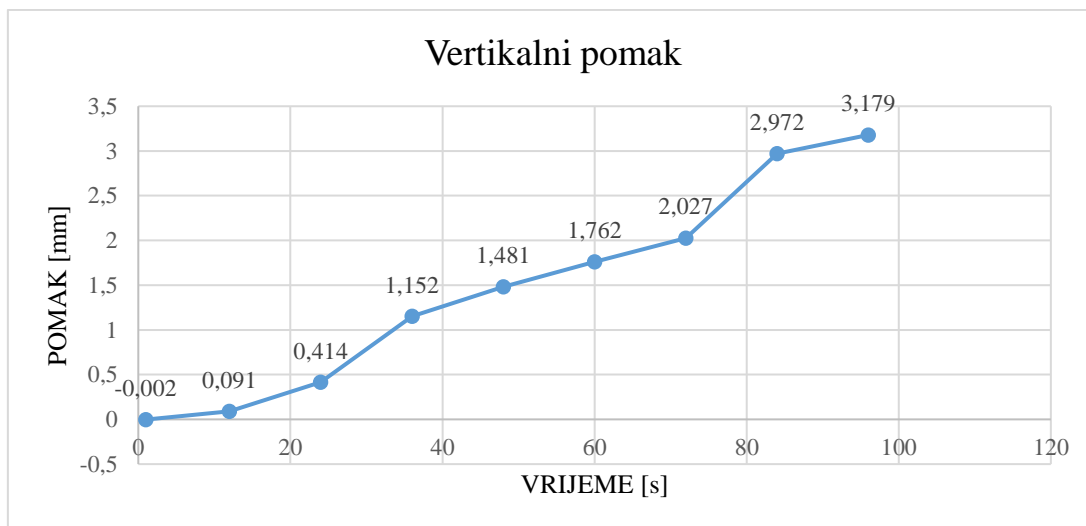
### Uzorak 3

Podaci iz tablice 4-1. pokazuju da uzorak 3 zadovoljava uvjete propisane ASTM standardom, za sve uzorke korišten je isti materijal, stoga i uzorak 3 zadovoljava uvjet maksimalne veličine čestica.

Vrijeme mjerenja 96 sek (1,6 min), uzorak se slomio pod silom 6147,1 N (slika 4-23.), pri pomaku od 2,027 mm (slika 4-24.).



Slika 4-23. Grafički prikaz sile sloma u vremenu, uzorak 3.



Slika 4-24. Grafički prikaz pomaka u vremenu, uzorak 3.

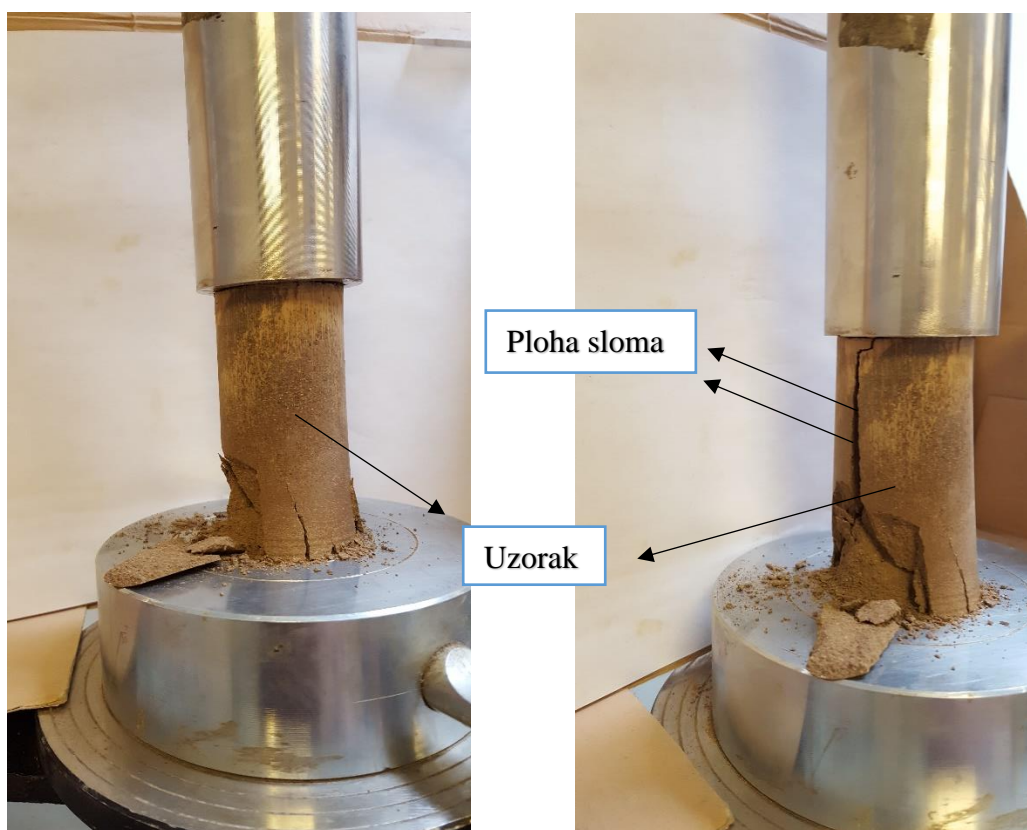
Iz izmjerenih vrijednosti računamo deformaciju uzorka  $\epsilon_v$ , prosječnu površinu presjeka  $A$  i maksimalno naprezanje  $\sigma_c$ .

$$\epsilon_v = 2,027 \text{ mm} / 75,15 \text{ mm} = 0,0269$$

$$A = 1201,96 / (1 - 0,0269) = 1235,18 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_c = 6147,1 \text{ N} / 1235,28 \text{ mm}^2 = 6,12 \text{ N/mm}^2 = 4,97 \text{ MPa}.$$

Uzorak se tijekom ispitivanja slomio, izgled sloma kao sa uzorka u mehanici stijena naziva se vlačni slom što je prikazano na slici 4-25. Vidljiva je ploha sloma. Uzorak se ponaša krto, poput stijene uz znatno niže vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće.



Slika 4-25. Slom uzorka, uzorak 3.

#### Uzorak 4

Podaci iz tablice 4-1. pokazuju da uzorak 3 zadovoljava sve uvjete propisane ASTM standardom, za sve uzorke korišten je isti materijal, stoga i uzorak 4 zadovoljava uvjet maksimalne veličine čestica.

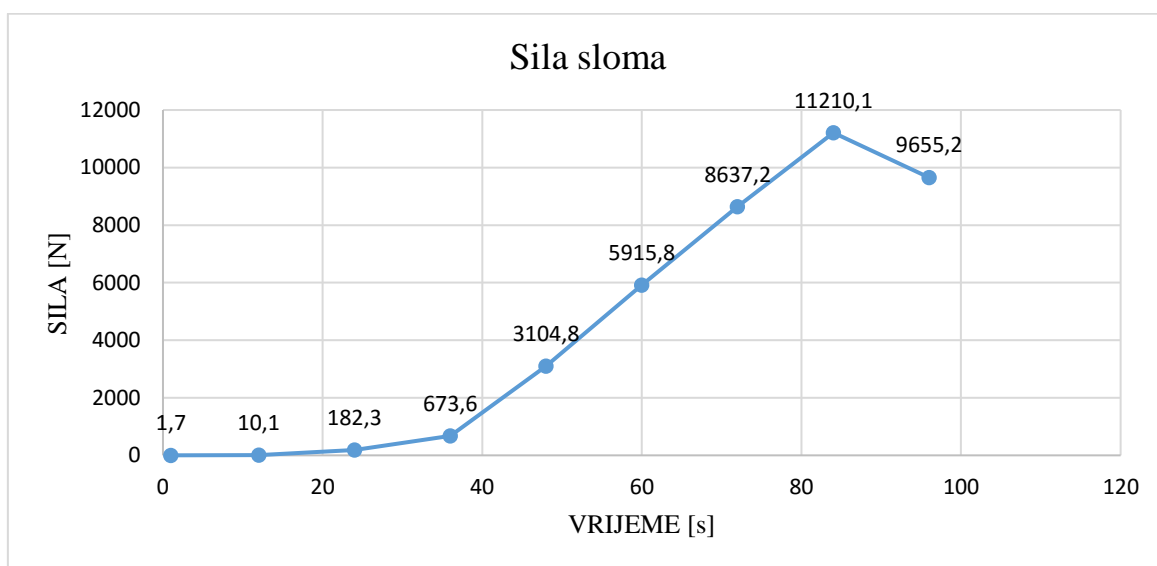
Vrijeme mjerenja 120 sek (2,0 min), uzorak se slomio pod silom 11210,1 N (slika 4-26.), pri pomaku od 0,361 mm (slika 4-27.).

Iz izmjerenih vrijednosti računa se vertikalna deformacija uzorka  $\epsilon_v$ , prosječna površina presjeka A i maksimalno naprezanje  $\sigma_c$ .

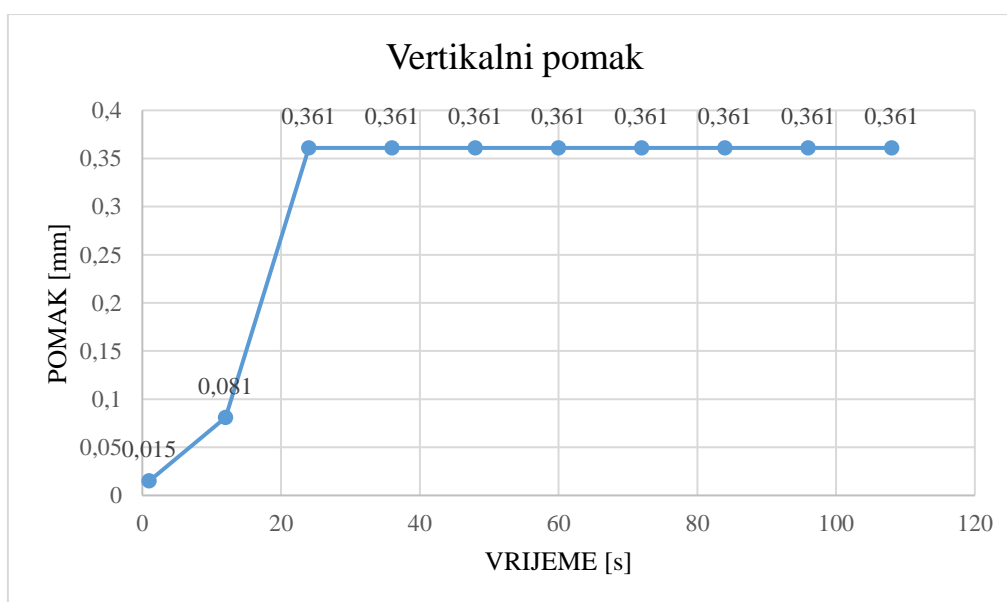
$$\epsilon_v = - \text{mm} / 79,85 \text{ mm} = 0$$

$$A = 1201,96 / (1 - 0) = 1201,96 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_c = 11210,1 \text{ N} / 1201,96 \text{ mm}^2 = 9,32 \text{ N} / \text{mm}^2 = 9,32 \text{ MPa}.$$



Slika 4-26. Grafički prikaz sile sloma u vremenu, uzorak 4.



Slika 4-27. Grafički prikaz pomaka u vremenu, uzorak 4.

Uzorak se tijekom ispitivanja slomio, izgled sloma kao sa uzorka u mehanici stijena naziva se smični slom što je prikazano na slici 4-28. Vidljiva je ploha sloma. Uzorak se također ponaša krto, poput stijene, uz znatno niže vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće. Posebnost uzorka 4 je sila prešanja, tj. sila kojom je uzorak pripreman. Uzorak 4 opterećen je najvećom silom te se za njega očekivalo i najveće vrijednosti čvrstoće. Tijekom ovog ispitivanja došlo je do anomalije u mjerenju pomaka, tijekom tlačenja uzorka prilikom mjerenja jednoosne tlačne čvrstoće u periodu od 24. sekunde mjerenja pa nadalje nema očitavanja vertikalnog pomaka. Dolazi do kvara osjetila pomaka te stoga pomak nije zabilježen. Vrijednost maksimalnog tlačnog naprezanja izračunata je na temelju početne površine iznosi 9,32 MPa.



Slika 4-28. Slom uzorka, uzorak 4.

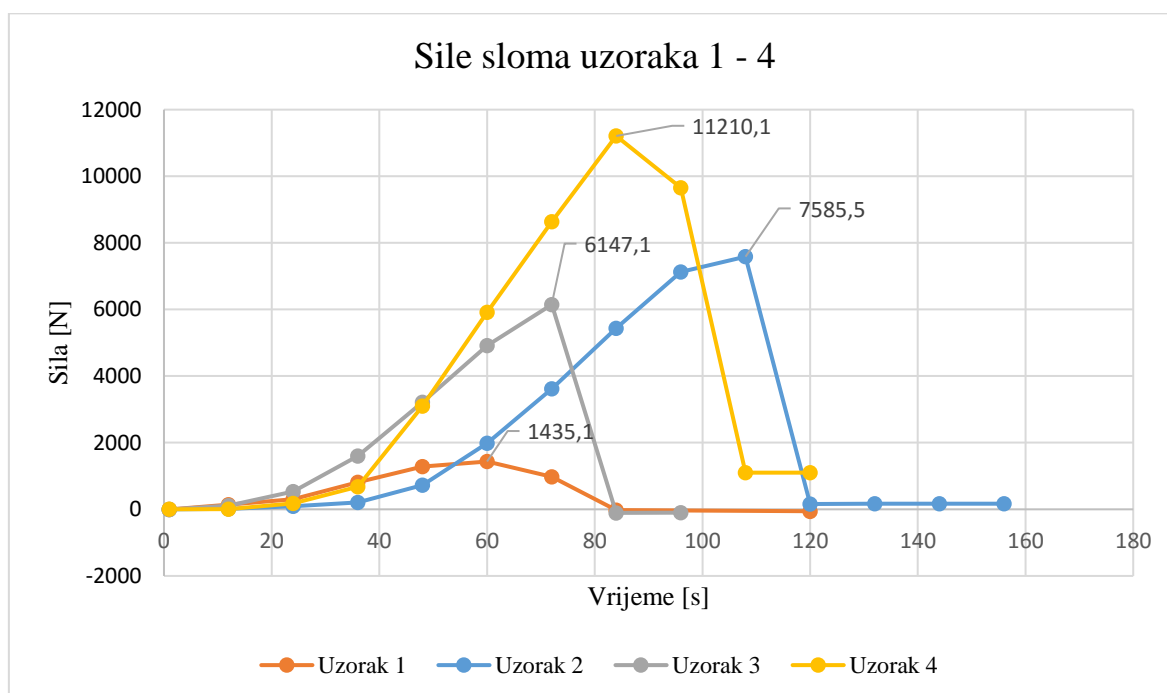
Usporedivši rezultate mjerenja, maksimalno naprezanje bilježi se kod uzorka koji je pripreman najvećom silom, kako je i očekivano. Pomalo iznenađujući rezultati javljaju se kod uzorka 2 za koji vrijednost  $\sigma_c$  premašuje uzorak 3, te bilježimo porast od 5,23 puta u odnosu na uzorak 1. Četvroslojni uzorak više nego učtverostručuje jednoosnu tlačnu čvrstoću što je bitan podatak za daljnja ispitivanja.

Vrste slomova uzoraka se razlikuju od uzorka do uzorka, ali svi spadaju u skupinu smičnih ili vlačnih slomova, nazvanih prema dominantnoj sili sloma. Uzorci se lome uslijed smične, tj. vlačne sile. Vlačna čvrstoća uzorka i čvrstoća na posmik slabe su točke ispitivanih

uzoraka. Uzorke prilikom ugrađivanja u odlagališta treba opteretiti što je moguće manjom smičnom ili vlačnom silom.

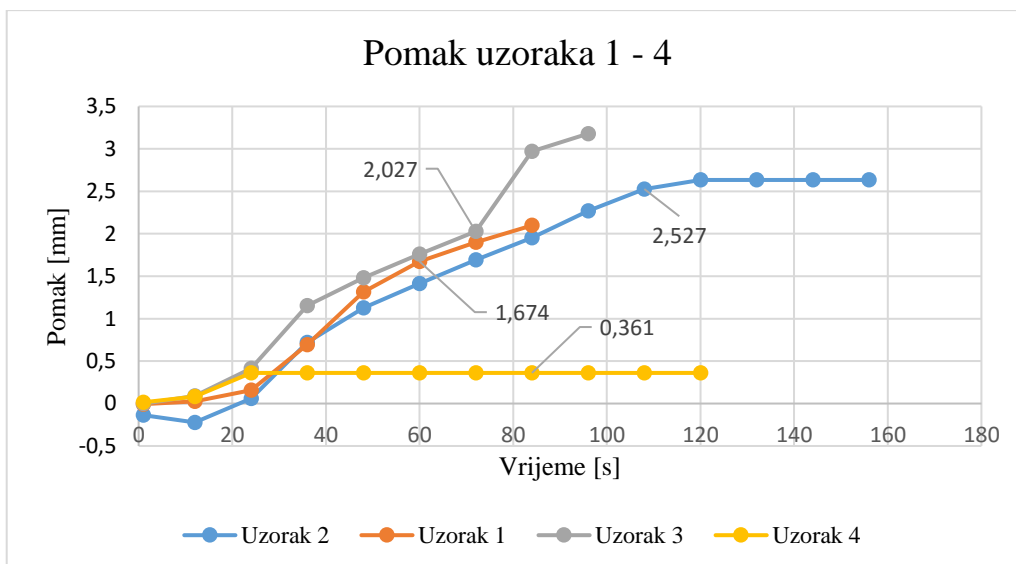
Tablica 4-4. Usporedba izračunatih parametara uzoraka.

Br. uzorka	br. slojeva	sila zbijanja [kN]	$\sigma_c$ [MPa]	A [mm <sup>2</sup> ]	EI [-]	Vrsta sloma
1	1	50	1,17	1226,13	0,0187	-
2	4	50	6,12	1238,87	0,0313	smični
3	1	100	4,97	1235,18	0,2690	vlačni
4	1	200	9,28	1207,42	0,0045	smični



Slika 4-29. Grafički prikaz sile sloma uzoraka 1 – 4.

Slike 4-29. i 4-30. grafički prikazuju usporedbu vrijednosti zapisa mjerenja tijekom ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće. Istaknute su maksimalne vrijednosti, te je jasno vidljivo da je maksimalna sila loma prisutna u ispitivanju uzorka 4, a najveći pomak u trenutku loma bilježi uzorak 2. Uzorak 4 prešan je najvećom silom, te je ostvarena najveća zbijenost u odnosu na ostala 3 uzorka, a time i najveća sila loma. Priprema uzorka 2 u odnosu na ostale uzorke razlikuje se prema broju slojeva, uzorak je prešan u četiri sloja. Kompakcija uzorka na taj način omogućava prešanom uzorku najveću deformaciju prilikom sloma. Rezultat pomaka uzorka 4 daje bitnu informaciju o deformabilnosti uzoraka pripremljenih u 4 sloja.



Slika 4-30. Grafički prikaza pomaka uzoraka 1 – 4.



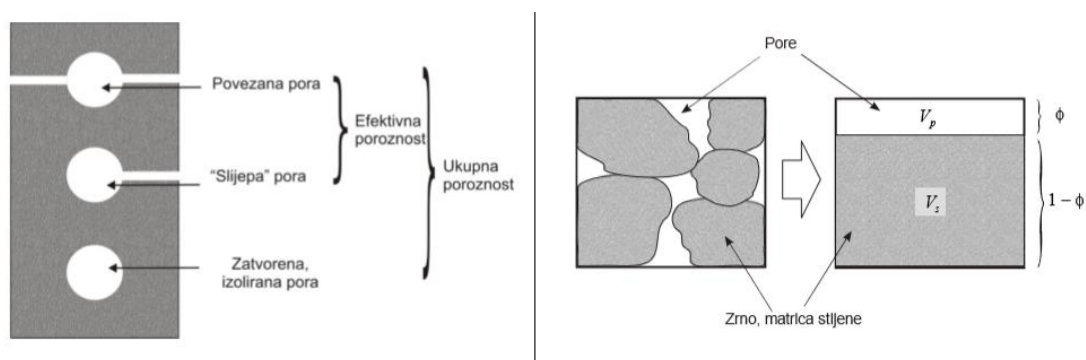
## 4.3 Ispitivanje permeabilnosti i poroznosti

### 4.3.1 Poroznost

Poroznost,  $\phi$  je omjer volumena pora (šupljina),  $V_p$  i ukupnog volumena,  $V_t$  dijela promatrane stijene.

Ukupna (apsolutna) poroznost je omjer volumena svih pora u stijeni i ukupnog volumena stijene (slika 4-31.). Efektivna poroznost je omjer volumena međusobno povezanih pora i ukupnog volumena stijene (slika 4-31.) (Vulin, 2012). U ovom radu pod poroznošću podrazumijeva se efektivna poroznost:

$$\phi = \frac{V_p}{V_t} = \frac{V_t - V_s}{V_t} \quad (4-5)$$



Slika 4-31. Ukupna poroznost (desno), odnos efektivne i ukupne poroznosti (lijevo) (Vulin, 2012).

Odabrana tehnika mjerenja poroznosti najčešće ovisio vrsti stijene i o vremenu potrebnom za uzorkovanje (Vulin, 2012). Metode mjerenja parametara za određivanje poroznosti prikazane su u tablici 4-5.

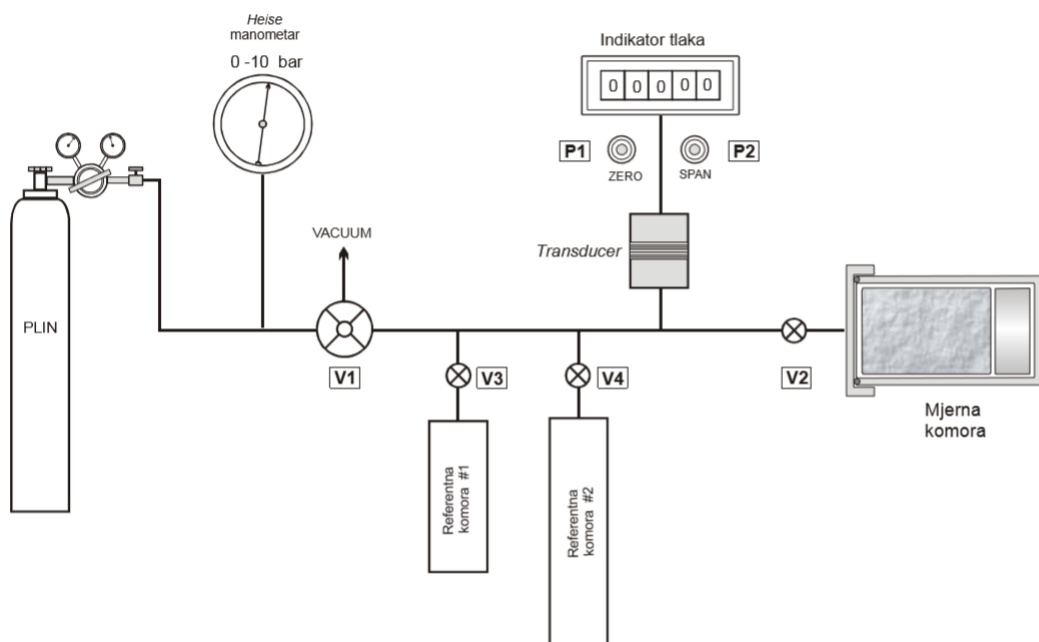
Tablica 4-5. Metode mjerenja parametara potrebnih za određivanje poroznosti (Vulin, 2012).

Ukupni volumen	Volumen zrna	Volumen pora
Računom iz mjerenih dimenzija pravilno geometrijski oblikovanog	Gravimetrija, piknometrom	Gravimetrija, mjerenjem mase fluida u porama uzorka stijene

uzorka stijene (valjak, kocka)		
Volumetrija živom (Hg) (uranjanjem jezgre u živu)	Gravimetrija uz primjenu Arhimedova zakona	Volumetrija, injektiranjem Hg u porni prostor
Gravimetrija uz primjenu Arhimedova zakona	Volumetrija uz primjenu Boyleovog zakona	Volumetrija uz primjenu Boyleovog zakona
		Zbrajanjem mjerenih masa ili volumena fluida u pornom prostoru.

Gravimetrija, zbrajanje fluida, volumetrija živom i piknometar rijeđe su primjenjivane metode u odnosu na helijsku porozimetriju. Sve metode zasnivaju se na mjerenju masa i volumena. Raznim načinima određuju se mase uzoraka, ukupni volumeni i volumeni pora. Metode su vrlo detaljno objašnjene u *Petrofizika ležišta ugljikovodika, Vulin, 2012.*

Najprimjenjivanija, tj najčešća metoda koja je ujedno i korištena u mjerenjima je helijska porozimetrija. Za metodu su potrebni čisti ekstrahirani uzorci i aparatura prikazana na slici 4-32. Maksimalan promjer uzoraka u obliku valjčića je 1,5“. Metoda se temelji na Boyleovom zakonu. Plin se iz referentnog spremnika ispušta u mjernu ćeliju, prije ispuštanja mjeri se tlak plina u referentnoj ćeliji nakon čega su poznati  $p_1=p_{ref}$  i  $V_1=V_{ref}$  (Vulin, 2012).



Slika 4-32. Shema uređaja za mjerenje poroznosti helijskom porozimetrijom (Vulin, 2012).

- V1 – trosmjerni ventil
- V2, V3, V4 – prekidni ventili.

V1 – može biti postavljen u 3 položaja, sustav otvoren prema vakuum pumpi, položaj prekinut, položaj u kojem je tok plina u sustav dozvoljen. Pod sustavom podrazumijevaju se sve komore i tlačne cijevi. Ventili V2, V3 i V4 su prekidni ventili(Vulin, 2012).

Boyleov zakon glasi  $p_1V_1 = p_2V_2$  ( pri konstantnoj temperaturi) i jednostavno se može izračunati volumen zrna,  $V_s$  (Vulin, 2012):

$$V_s = V_1 + V_m - \frac{p_1V_1}{p_2} \quad (4-6)$$

Ukupni volumen jezgre,  $V_t$  izračuna se mjerenjem promjera i duljine valjčićai poroznost je tada (Vulin, 2012):

$$\phi = \frac{V_t - V_s}{V_t} = \frac{V_p}{V_t} \quad (4-7)$$

Plin je ušao samo u povezane pore te se stoga helijskom porozimetrijom izravno mjeri efektivna poroznost (Vulin, 2012).

Na uzorcima 7-12 poroznost je mjerena helijskom porozimetrijom, slika 4-32. shematski prikazuje korištenu aparaturu. Mjerenje je izvedeno u Laboratoriju za petrofiziku i ležišne fluide RGNf-a (slika 4-33.). Uzorci su odmah nakon mjerenja permeabilnosti podvrgnuti mjerenju poroznosti. Helijska porozimetrija kao najprimjenjivanija metoda mjerenja poroznosti pokazala se i najprikladnijom.



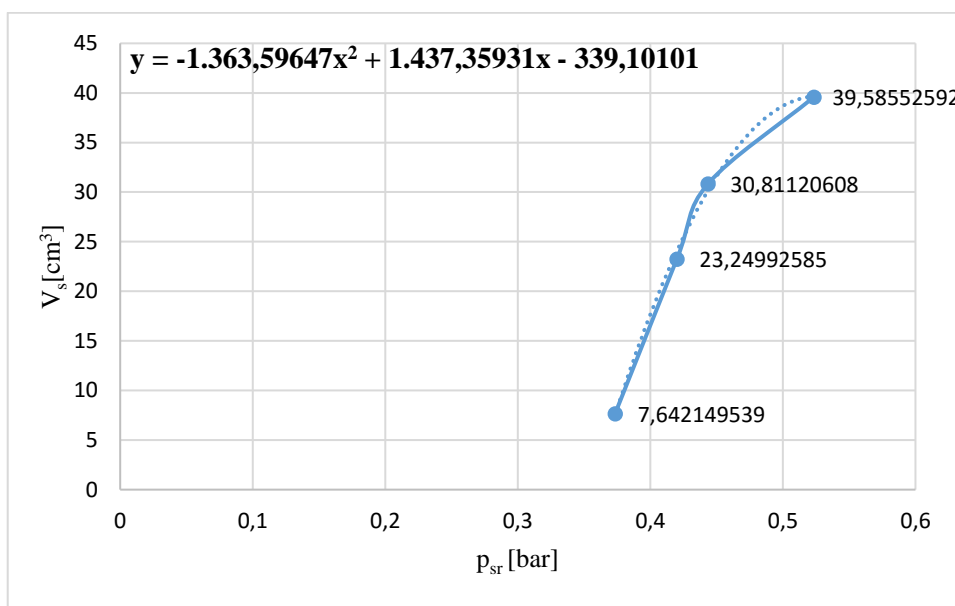
Slika 4-33. Oprema za mjerenje poroznosti.

Kako bi se izračunala poroznost iz dobivenih mjerenih podataka (tlaka  $p_2$ ) potrebno je izmjeriti volumene i poroznosti tzv. kalibracijskih valjčića. Riječ je o valjčićima od nehrđajućeg čelika za koje smatramo da nemaju pornog prostora (osim eventualnih oštećenja površine). Postoje 4 kalibracijska valjčića označeni prema veličini, od najvećeg prema najmanjem (XL, L, M, S). U tablici 4-6. prikazana su mjerenja kalibracijskih valjčića.

Tablica 4-6. Dimenzije, volumen kalibracijskih valjčića.

Kalib. Valjčić	$p_2$ [bar]	$p_{sr}$ [bar]	Visina [cm]	Srednje vrijednosti		
				$h_{sr}$ [cm]	d [cm]	$V_s$ [cm <sup>3</sup> ]
XL	0,51	0,52333	H= 3,26	3,2633333	3,93	39,5855
XL	0,54		H= 3,26			
XL	0,52		H= 3,27			
L	0,44	0,44333	H= 2,54	2,54	3,93	30,8112
L	0,45		H= 2,54			
L	0,44		H = 2,54			
M	0,41	0,42	H= 1,91	1,9166667	3,93	23,2499
M	0,42		H= 1,92			
M	0,43		H= 1,91			
S	0,37	0,37333	H= 0,63	0,63	3,93	7,64215
S	0,37		H= 0,63			
S	0,38		H= 0,63			

Pomoću volumena kalibracijskih valjčića i ostvarenog tlaka dobiva se kalibracijska krivulja (slika 4-34.). Jednadžba kalibracijske krivulje grafa bitna je za daljnje računanje volumena  $V_s$  uzoraka 7 – 12.



Slika 4-34. Kalibracijska krivulja.

Svaki uzorak izmjeren je 2 puta, pomičnim mjerilom dimenzije uzorka ( $d$ ,  $H$ ), računski  $V$ , a  $V_s$  je dobiven koristeći jednadžbu kalibracijske krivulje (4-8):

$$y = -1.363,59647x^2 + 1.437,35931x - 339,10101 \quad (4-8)$$

Vrijednost varijable  $x$  određena je mjerenjem za svaki uzorak posebno. Srednja vrijednost tlaka  $p_2$  predstavljala je traženi  $x$ . Jednostavnim uvrštavanjem u jednadžbu krivulje dobivamo vrijednost  $V_s$ . Ostale vrijednosti prikazane u tablici (4-7.) dobivene su prema prikazanim formulama. Volumen  $V_s$  potreban je za konačno određivanje poroznosti uzorka kao što je prikazano u tablici (4-7.).

Tablica 4-7. Poroznost uzoraka 7-12.

Prvo mjerenje								
Br. uzorka	$p_2$	$p_{sr}$	$V_s$	$V_p = V - V_s$	$\phi = V_p/V$	$V$	$d$	$H$
7	0,48	0,485	37,26628	11,37802	23,4%	48,6443	3,81	4,27
7	0,49							
Drugo mjerenje								
Br. uzorka	$p_2$	$p_{sr}$	$V_s$	$V_p = V - V_s$	$\phi = V_p/V$	$V$	$d$	$H$
7	0,98	0,98	37,74234	10,90196	22,4%	48,6443	3,81	4,27

7	0,98							
<b>Prvo mjerenje</b>								
<b>Br. uzorka</b>	p2	psr	Vs	Vp = V-Vs	$\varphi=Vp/V$	V	d	H
8	0,49	0,49	37,80554	7,320612	16,2%	45,12615	3,79	4,00
8	0,49							
<b>Drugo mjerenje</b>								
<b>Br. uzorka</b>	p2	psr	Vs	Vp = V-Vs	$\varphi=Vp/V$	V	d	H
8	0,98	0,98	37,74234	7,383812	16,4%	45,12615	3,79	4,00
8	0,98							
<b>Prvo mjerenje</b>								
<b>Br. uzorka</b>	p2	psr	Vs	Vp = V-Vs	$\varphi=Vp/V$	V	d	H
9	0,49	0,49	37,80554	9,201244	19,6%	47,00678	3,79	4,1667
9	0,49							
<b>Drugo mjerenje</b>								
<b>Br. uzorka</b>	p2	psr	Vs	Vp = V-Vs	$\varphi=Vp/V$	V	d	H
9	0,98	0,98	37,74234	9,264445	19,7%	47,00678	3,79	4,1667
9	0,98							
<b>Prvo mjerenje</b>								
<b>Br. uzorka</b>	p2	psr	Vs	Vp = V-Vs	$\varphi=Vp/V$	V	d	H
10	0,49	0,49	37,80554	7,094981	15,8%	44,90052	3,79	3,98
10	0,49							
<b>Drugo mjerenje</b>								
<b>Br. uzorka</b>	p2	psr	Vs	Vp = V-Vs	$\varphi=Vp/V$	V	d	H
10	0,98	0,985	38,01578	6,884743	15,3%	44,90052	3,79	3,98
10	0,99							
<b>Prvo mjerenje</b>								
<b>Br. uzorka</b>	p2	psr	Vs	Vp = V-Vs	$\varphi=Vp/V$	V	d	H
11	0,49	0,49	37,80554	7,207796	16,0%	45,01334	3,79	3,99
11	0,49							
<b>Drugo mjerenje</b>								
<b>Br. uzorka</b>	p2	psr	Vs	Vp = V-Vs	$\varphi=Vp/V$	V	d	H
11	0,99	0,99	38,27295	6,740383	15,0%	45,01334	3,79	3,99
11	0,99							
<b>Prvo mjerenje</b>								
<b>Br. uzorka</b>	p2	psr	Vs	Vp = V-Vs	$\varphi=Vp/V$	V	d	H
12	0,49	0,49	37,80554	6,746131	15,1%	44,55167	3,78	3,97
12	0,49							
<b>Drugo mjerenje</b>								
<b>Br. uzorka</b>	p2	psr	Vs	Vp = V-Vs	$\varphi=Vp/V$	V	d	H
12	0,99	0,99	38,27295	6,278718	14,1%	44,55167	3,78	3,97
12	0,99							

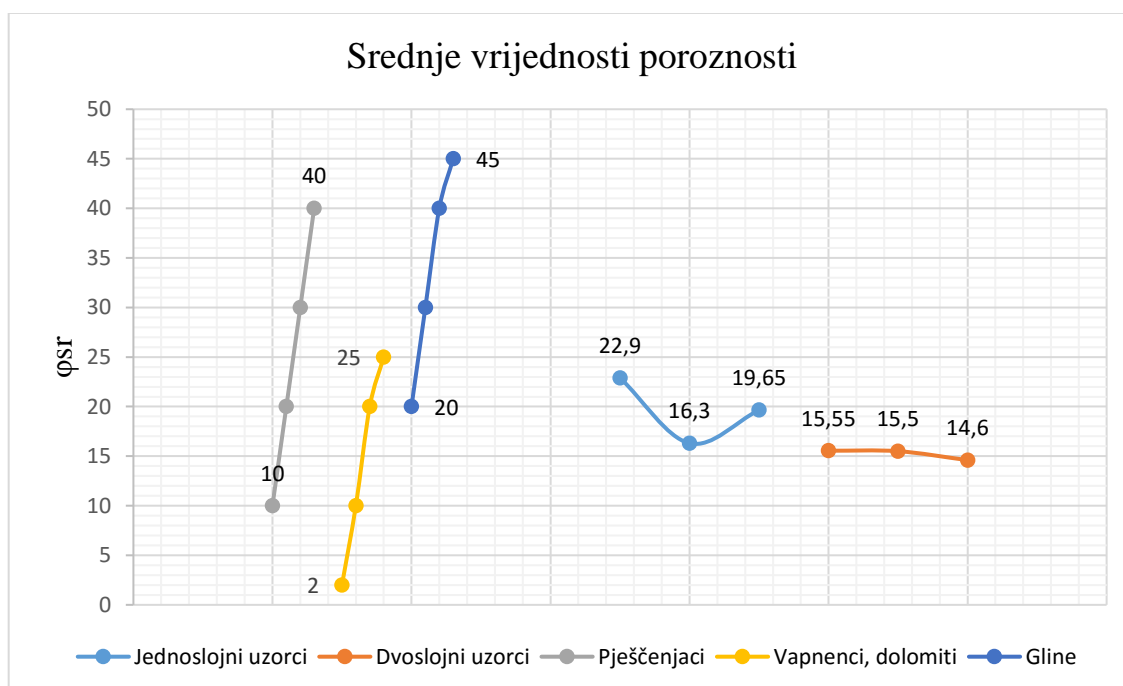
p<sub>2</sub> – tlak plina u slobodnom prostoru, p<sub>sr</sub> – srednja vrijednost 2 mjerenja p<sub>2</sub>, V<sub>s</sub> – volumen uzorka, V<sub>p</sub> – volumen plina,  $\varphi$  – poroznost, V – volumen uzorka (izračunati), d – promjer uzorka, H – visina uzorka.

Kako bi se što bolje razumjeli dobiveni rezultati u tablici 4-8. su prikazani tipični rasporedi poroznosti nekih stijena prema (Vulin, 2012):

Tablica 4-8. Tipične poroznosti nekih stijena/ tala.

Stijena/ tlo	$\varphi$ [%]
pješčenjaci	10 – 40
vapnenci, dolomiti	2 – 25
gline	20 – 45

Vrijednosti poroznosti dobivenih uzoraka variraju od 14,1% za dvoslojne uzorke do 23,4% za jednoslojne uzorke. Očekivane vrijednosti poroznosti poklapaju se s dobivenima, tj. dvoslojni uzorci uslijed veće zbijenosti imaju manju poroznost, dok se jednoslojni uzorci nalaze na donjoj granici tipičnih vrijednosti poroznosti glina. Poroznost dvoslojnih uzoraka znatno je manja od poroznosti jednoslojnih, čime takvi uzorci postaju prikladniji za ugradnju u odlagališta RAO.



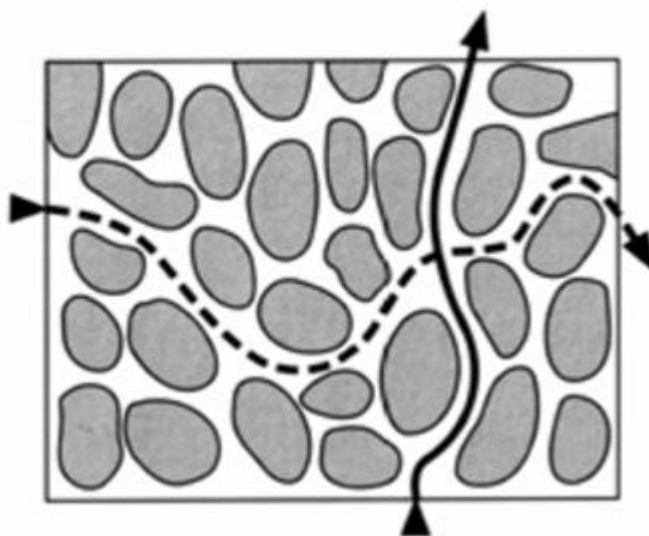
Slika 4-35. Srednje vrijednosti poroznosti uzoraka i tipične vrijednosti nekih stijena.

Raspored srednjih vrijednosti poroznosti uzoraka različit je za dvije skupine uzoraka (slika 4-35.), uzorci prešani u dva sloja pokazuju vrlo slične vrijednosti, tj. odstupanja su prilično mala. Za uzorke prešane u jednom sloju ne može se reći da imaju slične poroznosti, oscilacije u vrijednostima su prilično velike. Razlog tome je nedovoljna zbijenost gline, tj.

za konsolidaciju, preslagivanje čestica i izlazak zraka iz pornog prostora u jednoslojnim uzorcima potrebno je više vremena ili veća sila.

#### 4.3.2 Propusnost (permeabilnost)

Mjera sposobnosti nekog medija da omogući protjecanje fluida kroz taj medij uslijed razlike potencijala naziva se propusnost (Vulin, 2012). Protok fluida u poroznom mediju odvija se kroz sustav međusobno povezanih pora (slika 4-36.).



Slika 4-36. Shema protjecanja fluida kroz stijenu (Vulin, 2012).

Henry Darcy postavio je zakon jednodimenzionalnog toka vode kroz pijesak baveći se dizajniranjem pješčanih filtera za pročišćavanje vode. Bio je inženjer građevinarstva i bavio se vodoopskrbbom Dijona u Francuskoj. Temeljni zakon koji opisuje laminarni gravitacijski tok vode u poroznoj sredini ustanovljen je eksperimentalno (Bačani, 2006).

Darcy je ustanovio kako veličina volumetrijskog protoka vode,  $q$  kroz vertikalni pješčani filter površine presjeka protjecanja,  $A$  i duljine,  $L$  izravno ovisi o razlici visina stupaca vode ulaznog i izlaznog manometra ( $p_2-p_1$ ) (Vulin, 2012):

$$q = C \frac{A \Delta h}{L} \quad (4-9)$$



C – konstanta proporcionalnosti, ovisi o karakteristikama poroznog medija i viskoznosti fluida, A – površina poprečnog presjeka medija,  $\Delta h$  – razlika potencijala, L – duljina medija. Detaljnije objašnjeno u *Petrofizika ležišta ugljikovodika*, Vulin, 2012.

Da bi poopćena darcyjeva jednadžba za propusnost vrijedila (4-10), pore moraju biti potpuno ispunjene fluidom koji protječe, ne smije biti fiz.-kem. interakcija između fluida i poroznog medija, a režim protoka mora biti laminaran.

Iz Darcyjeve jednadžbe propusnost poroznog medija je (Vulin, 2012):

$$k = -\frac{q}{A} \frac{L}{(\Phi_1 \Phi_2)} \mu \quad (4-10)$$

Dimenzionalnom analizom dobije se (Vulin, 2012):

$$k = \frac{m^3}{s} \times m \times \frac{1}{m^2} \times \frac{1}{N/m^2} \times \frac{N}{m^2} \times s = m^2 \quad (4-11)$$

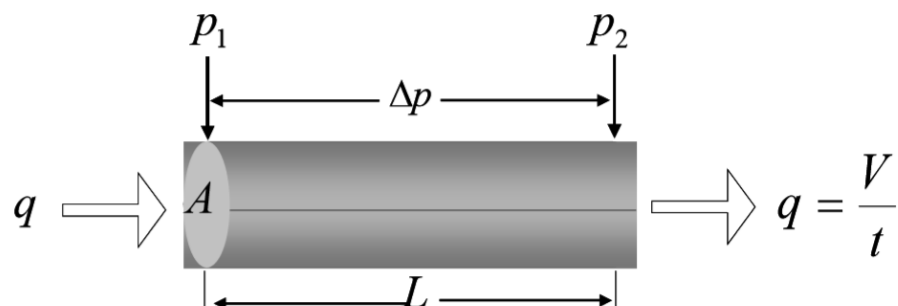
Propusnost od 1 m<sup>2</sup> omogućava protok od 1 m<sup>3</sup>/s fluida viskoznosti 1 Pa s kroz površinu protjecanja od 1 m<sup>2</sup> uz tlačni gradijent od 1 Pa/m. Tradicionalna jedinica za propusnost je darcy, D (Vulin, 2012):

$$k = \frac{\frac{[cm^3]}{[s]} [cm] [cP]}{[cm^2] [Atm]} = [D] = [cm^2] \quad (4-12)$$

Većina ležišnih stijena ima propusnost mnogo manju od 1 D, prihvaćena jedinica za propusnost je milidarcy, mD (1mD = 10<sup>-15</sup>m<sup>2</sup>) (Vulin, 2012).

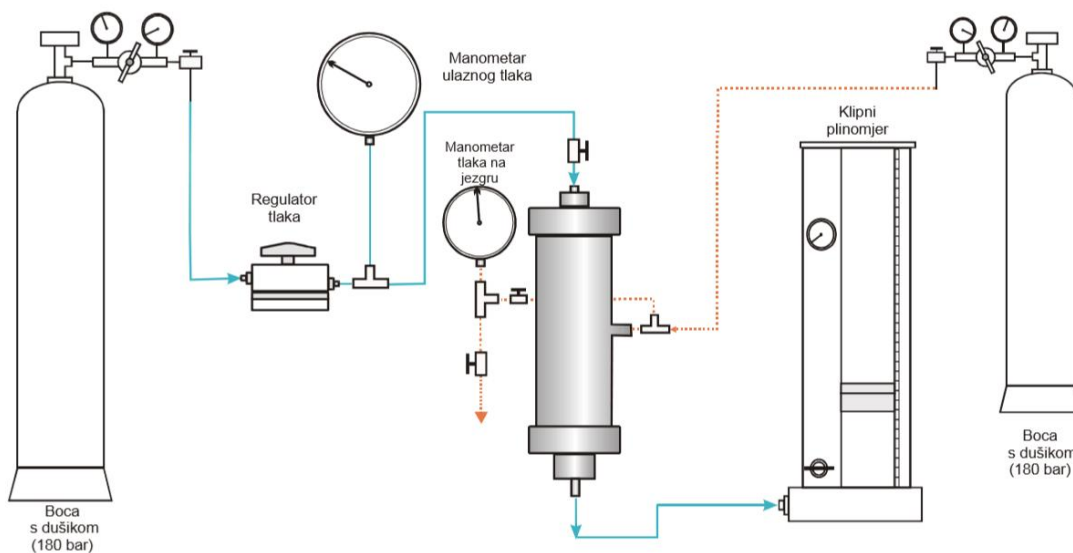
Mjerenja propusnosti (permeabilnosti) rađena su na uzorcima 7-12 u Laboratoriju za petrofiziku i ležišne fluide RGNf-a. Prilikom protjecanja plina kroz uzorak mjere se volumeni fluida u jedinici vremena i pripadni tlačni gradijent (slika 4-37.) (Vulin, 2012). Apsolutnu poroznost računamo uvrštavanjem mjerenih podataka u Darcyjevu jednadžbu za protok fluida:

$$k = \frac{V}{t} \frac{L}{A} \mu \Delta p \quad (4-13)$$



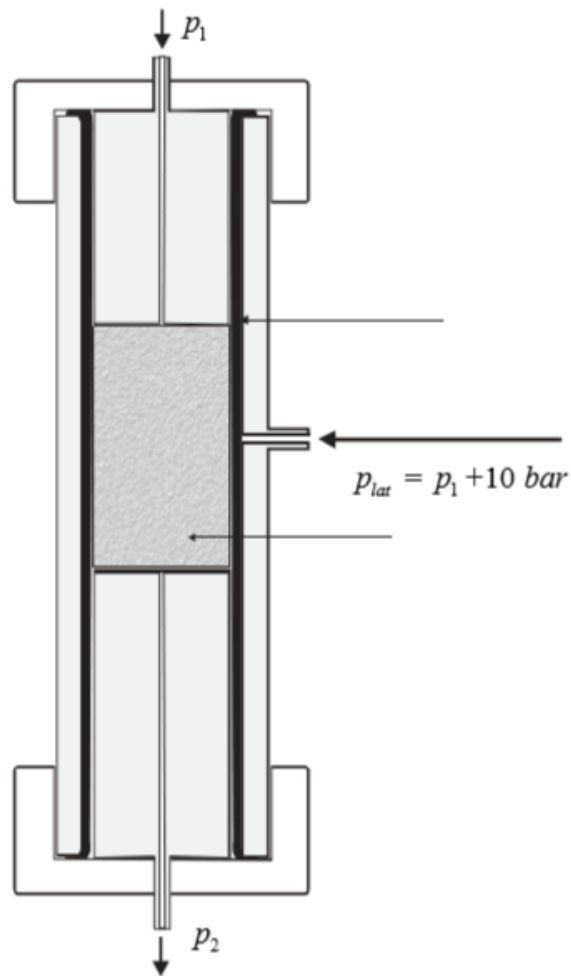
Slika 4-37. Shematski prikaz protoka fluida uz odgovarajuće oznake (Vulin, 2012).

Dušik iz boce je izvor tlakova koji simuliraju petrostatski i porni tlak. Iako se na jezgri primjenjuje tlak cca 10 bar. Svrha je utvrditi utjecaj bočnog tlaka na propusnost uzorka. Shematski prikaz uređaja vidljiv je na slici 4-38.



Slika 4-38. Shematski prikaz uređaja za mjerenje propusnosti protokom plina (Vulin, 2012).

Na slici 4-39. shematski je prikazan hidrostatski držač jezgre koji se nalazi u uređaju za mjerenje propusnosti. Jezgra se nalazi u gumenom rukavcu na koji se nanosi tlak iz boce s dušikom. Metalni element kojim je učvršćen uzorak ima rupicu za protok i kanaliće za raspodjelu tlaka plina po površini baza uzorka (Vulin, 2012). Za korištenje tekućine potrebno je koristiti drugačiji tip držača.



Slika 4-39. Shematski prikaz hidrostatskog držača jezgre (Vulin, 2012).

Konstantan tlak plina održava se regulatorom tlaka. Tlak se očitava na manometru koji je postavljen iza regulatora. Plin prolaskom kroz uzorak izlazi iz držača i visokotlačnim vodom odlazi u klipni plinomjer. Volumen plina u klipnom plinomjeru i vrijeme potrebno da se taj volumen ispuni mjeri se u nekoliko točaka.

Mjerenje apsolutne propusnosti protokom plina 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. (Vulin, 2012).

#### 4.3.2.1 Pregled rezultata mjerenja

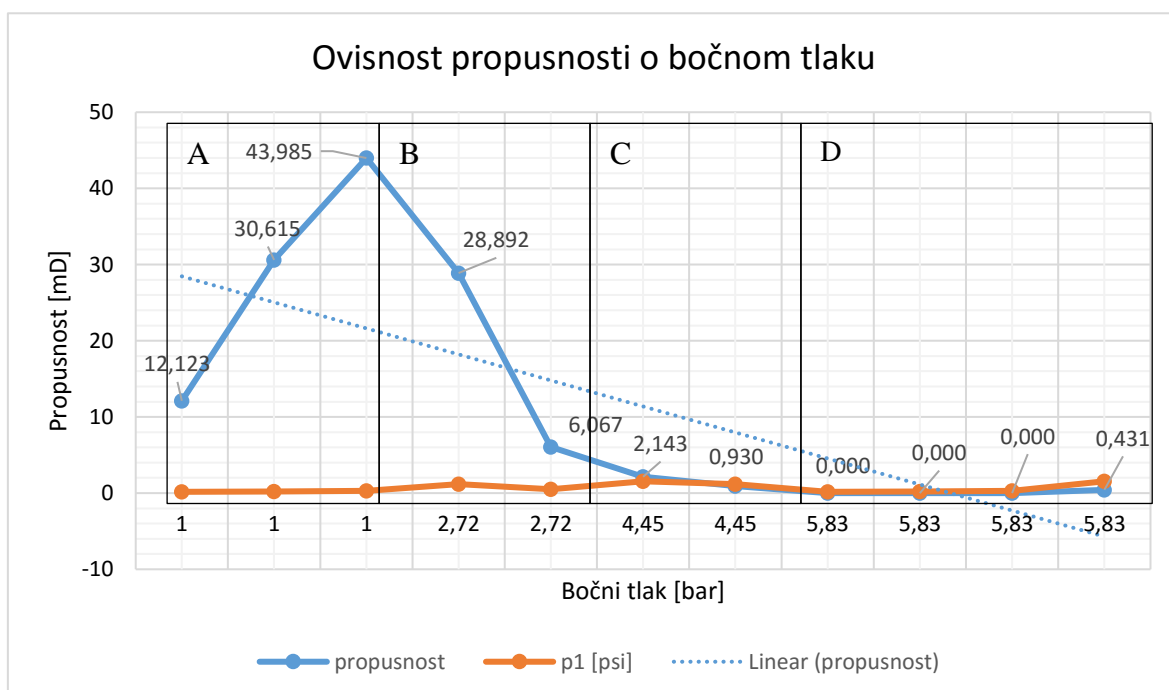
Tablica 4-9. Zapis mjerenja propusnosti, uzorak 7.

UZORAK 7																	
broj mjerenja	d cm	l cm	OB psi	p1 bar	p2 in H <sub>2</sub> O	V cm <sup>3</sup>	t s	OB bar (a)	p1 Pa	p2 Pa	A cm <sup>2</sup>	q <sub>2</sub> cm <sup>3</sup> /s	P <sub>avg</sub> Pa	q cm <sup>3</sup> /s	m Pas	k cm <sup>2</sup>	k mD
1	3,81	4,2667	0	0,1700	3	50	175	1,00	118325	102072	11,4	0,3	110199	0,3	0,000017667	1,0765946E-10	10,9086
2	3,81	4,2667	0	0,1700	3	100	318	1,00	118325	102072	11,4	0,3	110199	0,3	0,000017667	1,1849311E-10	12,0063
3	3,81	4,2667	0	0,1700	3	210	596	1,00	118325	102072	11,4	0,4	110199	0,3	0,000017667	1,3276795E-10	13,4527
4	3,81	4,2667	0	0,2150	3	100	97	1,00	122825	102072	11,4	1,0	112449	0,9	0,000017667	2,9814094E-10	30,2091
5	3,81	4,2667	0	0,2150	3	200	191	1,00	122825	102072	11,4	1,0	112449	1,0	0,000017667	3,0282379E-10	30,6836
6	3,81	4,2667	0	0,2150	3	300	284	1,00	122825	102072	11,4	1,1	112449	1,0	0,000017667	3,0548949E-10	30,9537
7	3,81	4,2667	0	0,2900	3	200	96	1,00	130325	102072	11,4	2,1	116199	1,8	0,000017667	4,2827243E-10	43,3947
8	3,81	4,2667	0	0,2900	3	400	189	1,00	130325	102072	11,4	2,1	116199	1,9	0,000017667	4,3507040E-10	44,0835
9	3,81	4,2667	0	0,2900	3	600	281	1,00	130325	102072	11,4	2,1	116199	1,9	0,000017667	4,3894114E-10	44,4757
10	3,81	4,2667	25	1,2000	3	100	12	2,72	221325	102072	11,4	8,3	161699	5,3	0,000017667	2,9165331E-10	29,5518
11	3,81	4,2667	25	1,2000	3	200	25	2,72	221325	102072	11,4	8,0	161699	5,1	0,000017667	2,7998718E-10	28,3697
12	3,81	4,2667	25	1,2000	3	300	37	2,72	221325	102072	11,4	8,1	161699	5,1	0,000017667	2,8377079E-10	28,7531
13	3,81	4,2667	25	0,5000	3	100	178	2,72	151325	102072	11,4	0,6	126699	0,5	0,000017667	6,0757595E-11	6,1563
14	3,81	4,2667	25	0,5000	3	200	368	2,72	151325	102072	11,4	0,5	126699	0,4	0,000017667	5,8776369E-11	5,9555
15	3,81	4,2667	25	0,5000	3	300	540	2,72	151325	102072	11,4	0,6	126699	0,4	0,000017667	6,0082511E-11	6,0879
16	3,81	4,2667	50	1,5500	3	50	60	4,45	256325	102072	11,4	0,8	179199	0,5	0,000017667	2,0345766E-11	2,0615
17	3,81	4,2667	50	1,5500	3	100	116	4,45	256325	102072	11,4	0,9	179199	0,5	0,000017667	2,1047344E-11	2,1326
18	3,81	4,2667	50	1,5500	3	150	166	4,45	256325	102072	11,4	0,9	179199	0,5	0,000017667	2,2061674E-11	2,2354
19	3,81	4,2667	50	1,2000	3	50	188	4,45	221325	102072	11,4	0,3	161699	0,2	0,000017667	9,3080843E-12	0,9431
20	3,81	4,2667	50	1,2000	3	100	387	4,45	221325	102072	11,4	0,3	161699	0,2	0,000017667	9,0435134E-12	0,9163
21	3,81	4,2667	70	0,1700	3	0	1000000	5,83	118325	102072	11,4	0,0	110199	0,0	0,000017667	0,0000000E+00	0,0000
22	3,81	4,2667	70	0,2150	3	0	1000000	5,83	122825	102072	11,4	0,0	112449	0,0	0,000017667	0,0000000E+00	0,0000
23	3,81	4,2667	70	0,2900	3	0	1000000	5,83	130325	102072	11,4	0,0	116199	0,0	0,000017667	0,0000000E+00	0,0000
24	3,81	4,2667	70	1,5500	3	50	296	5,83	256325	102072	11,4	0,2	179199	0,1	0,000017667	4,1241417E-12	0,4179
25	3,81	4,2667	70	1,5500	3	100	570	5,83	256325	102072	11,4	0,2	179199	0,1	0,000017667	4,2833191E-12	0,4340
26	3,81	4,2667	70	1,5500	3	150	840	5,83	256325	102072	11,4	0,2	179199	0,1	0,000017667	4,3598069E-12	0,4418

U tablici 4-9. zelenom bojom označene su izmjerene vrijednosti, a plavom bojom naslovi i izračunate vrijednosti. Mjerenja su podjeljena u nekoliko skupina, ovisno o bočnom tlaku (OB). Ukupno je odrađeno 26 mjerenja na uzorku 7, s bočnim tlakom 1 bar, 2,72 bar, 4,45 bar i 5,83 bar. U tablici 4-10. vidimo prosječne vrijednosti propusnosti izražene u mD iz kojih podataka je izrađen i graf (slika 4-40.) koji pokazuje međuovisnost prosječne propusnosti u ovisnosti o tlaku p1 (ulazni tlak) i koji prikazuje međuovisnost propusnosti u odnosu na bočni tlak.

Tablica 4-10. Prosječne vrijednosti propusnosti u mD i u m<sup>2</sup>.

<i>prosječni k</i> <i>mD</i>	<i>Prosječni k</i> <i>m<sup>2</sup></i>
12,12254	1,19640E-14
30,61549	3,02151E-14
43,98464	4,34095E-14
28,89152	2,85137E-14
6,06655	5,98722E-15
2,14319	2,11516E-15
0,92974	9,17580E-16
0,00000	0,00000E+00
0,43121	4,25576E-16



Slika 4-40. Ovisnost prosječnih vrijednosti propusnosti i bočnog tlaka, uzorak 8.

Graf je podjeljen u 4 dijela ovisno o bočnom tlaku, pa tako dio označen sa A predstavlja ispitivanje u kojem nije nanesen bočni tlak, u B dijelu postoji bočni tlak od 2,72 bar, C dio je dio mjerenja u kojem je bočni tlak iznosio 4,45 bar, a u D dijelu 5,83 bar. Plava linija označava međuovisnost propusnosti i bočnog tlaka, a iscrtkana plava linija opisuje tok vrijednosti propusnosti, tj. prikazuje generalni pad vrijednosti (propusnost se smanjuje). Smeđa linija predstavlja tlak p1, bitno je naglasiti da vrijednosti tlaka nisu u mjerilu, ali prikazuju trend rasta ili pada tlaka, linija služi kao ilustracija vrijednosti tlaka p1.

- A dio grafa:

Vrijednosti bočnog tlaka jednake su nuli, tj. nema zabilježenog dodatnog opterećenja plašta uzorka, bočni tlak iznosi 1 atm. Zabilježena je određena propusnost uzorka uz minimalan tlak  $p_1$ , uz malo povećanje tlaka  $p_1$  propusnost znatno raste. Ovakav porast vrijednosti  $k$  uzorka 7 za  $OB = 0$  bar može ukazati na izuzetnu propusnost uzorka koja se povećava čak i s najmanjim porastom tlaka, no nastavkom mjerenja ta pretpostavka se pokazuje netočnom. Nepostojanje bočnog tlaka dovodi do prolaska plina uz stijenke uzorka i navodi na krivi rezultat, već u B dijelu vidljivo je smanjenje propusnosti uz dodavanje bočnog tlaka.

- B dio grafa:

Dodavanjem bočnog tlaka od 2,72 bar zabilježena je znatno manja propusnost u odnosu na A dio uz znatno veći tlak  $p_1$ . Uzorak 7 nije porozan u tolikoj mjeri kao što se prikazalo nakon prvih nekoliko mjerenja. Odrađene su dvije skupine mjerenja sa istim bočnim tlakom. Smanjenjem tlaka  $p_1$  sa 1,5 na 0,5 bar, tj. za 58,33%, zabilježeno je znatno smanjenje propusnosti.

- C dio grafa:

Tijekom ispitivanja u C dijelu povećan je bočni tlak na 4,45 bar, za istu vrijednost  $p_1$  od 1,5 bar zabilježena je manja propusnost u odnosu na mjerenja u B dijelu. Daljnjim mjerenjem se potvrđuje pretpostavka da je dio plina „izgubljen“ uz stijenke uzorka ukoliko nije nanesen dovoljan bočni tlak.

- D dio grafa:

U ovom dijelu ispitivanja nanesen je bočni tlak od 5,83 bar koji se pokazao kao dovoljan da spriječi „gubitak“ plina uz stijenke uzorka. Uz takav bočni tlak za vrijednosti  $p_1$  od 0,17 – 0,29 bar nije zabilježen protok plina, tek uz povećanje  $p_1$  na 1,55 bar dolazi do prolaska plina kroz uzorak. Ne prolaskom plina pri većim bočnim tlakovima dokazana je pretpostavka „gubitka“ plina uz stijenke pri manjim bočnim tlakovima.

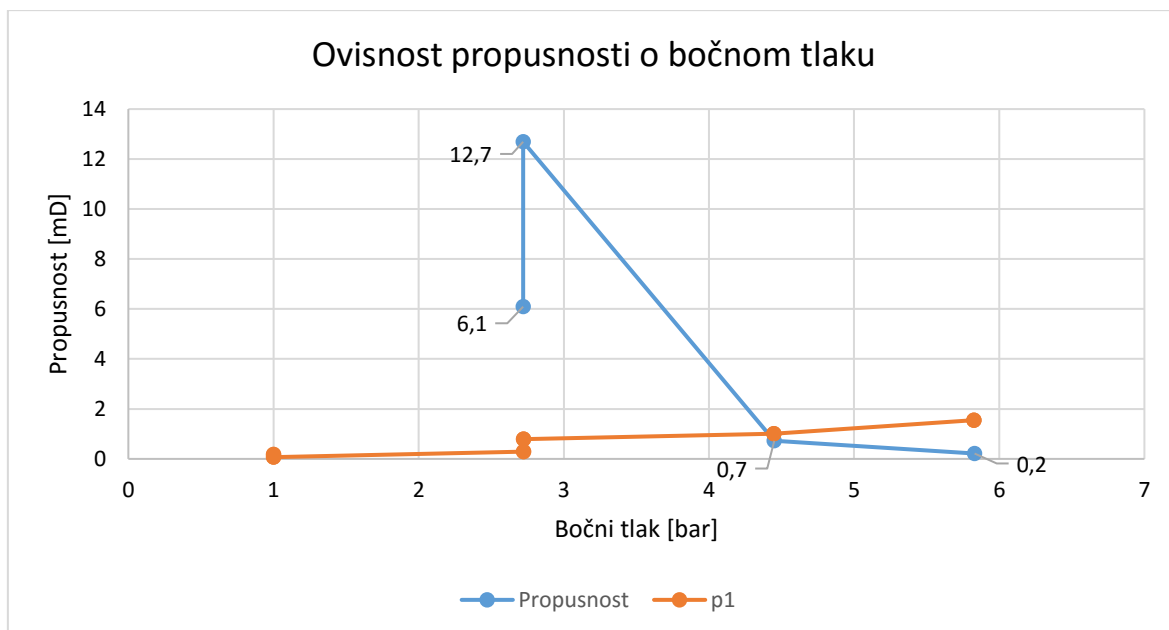
Tablica 4-11. Zapis mjerenja propusnosti, uzorak 8.

broj mjerenja	d cm	l cm	OB psi	p1 bar	p2 in H <sub>2</sub> O	V cm <sup>3</sup>	t s	OB bar (a)	p1 Pa	p2 Pa	A cm <sup>2</sup>	q <sub>2</sub> cm <sup>3</sup> /s	p <sub>avg</sub> Pa	q cm <sup>3</sup> /s	m Pas	k cm <sup>2</sup>	k mD
1	3,79	4,00	0	0,1700	3	200	12,5	1,00	118325	102072	11,3	16,0	110199	14,8	0,000017667	5,7118872E-09	578,7570
2	3,79	4,00	0	0,1700	3	400	24,5	1,00	118325	102072	11,3	16,3	110199	15,1	0,000017667	5,8284564E-09	590,5683
3	3,79	4,00	0	0,0700	3	500	55,3	1,00	108325	102072	11,3	9,0	105199	8,8	0,000017667	8,7887504E-09	890,5201
4	3,79	4,00	0	0,0700	3	1000	109,9	1,00	108325	102072	11,3	9,1	105199	8,8	0,000017667	8,8447297E-09	896,1922
5	3,79	4,00	25	0,2900	3	100	315	2,72	130325	102072	11,3	0,3	116199	0,3	0,000017667	6,1828714E-11	6,2648
6	3,79	4,00	25	0,2900	3	120	400	2,72	130325	102072	11,3	0,3	116199	0,3	0,000017667	5,8428135E-11	5,9202
7	3,79	4,00	25	0,7900	3	500	232	2,72	180325	102072	11,3	2,2	141199	1,6	0,000017667	1,2471373E-10	12,6366
8	3,79	4,00	25	0,7900	3	600	276	2,72	180325	102072	11,3	2,2	141199	1,6	0,000017667	1,2579820E-10	12,7465
9	3,79	4,00	50	1,0100	3	110	603	4,45	202325	102072	11,3	0,2	152199	0,1	0,000017667	7,6441756E-12	0,7745
10	3,79	4,00	50	1,0100	3	200	1266	4,45	202325	102072	11,3	0,2	152199	0,1	0,000017667	6,6199022E-12	0,6708
11	3,79	4,00	70	1,5500	3	30	308,3	5,83	256325	102072	11,3	0,1	179199	0,1	0,000017667	2,2508286E-12	0,2281
12	3,79	4,00	70	1,5500	3	50	575	5,83	256325	102072	11,3	0,1	179199	0,0	0,000017667	2,0113926E-12	0,2038

Na uzorku 8 provedeno je 12 mjerenja kao što je vidljivo u tablici 4-10., zelenom bojom označene su izmjerene vrijednosti, plavom bojom naslovi i izračunate vrijednosti. Mjerenja su podjeljena u nekoliko skupina kao kod uzorka 7, ovisno o bočnom tlaku. Tablica 4-11. prikazuje prosječne vrijednosti propusnosti u mD i m<sup>2</sup>. Prema istim podacim izrađen je graf (slika 4-41.), njime je prikazana međuovisnost prosječnih vrijednosti propusnosti u ovisnosti o ulaznom tlaku (p<sub>1</sub>) te međuovisnost propusnosti u odnosu na bočni tlak.

Tablica 4-12. Prosječne vrijednosti propusnosti izrađene u mD i u m<sup>2</sup>.

OB psi	Prosječni k mD	Prosječni k m <sup>2</sup>
0	584,7	5,77017E-13
0	893,4	8,81674E-13
25	6,1	6,01284E-15
25	12,7	1,25256E-14
50	0,7	7,13204E-16
70	0,2	2,13111E-16



Slika 4-41. Ovisnost prosječnih vrijednosti propusnosti i bočnog tlaka, uzorak 8.

Iz gornjeg grafa vidljiva je međuovisnost propusnosti i bočnog tlaka, plava linija predstavlja vrijednosti propusnosti obzirom na bočni tlak, radi lakšeg prikaza ekstremne vrijednosti nisu prikazane ( za bočni tlak  $OB = 1$  bar, prosječna propusnost,  $k_{sr}$  je iznosila 584,7, tj. 893,4 mD). Iz prikazanih vrijednosti vidljiva je važnost nanošenja bočnog tlaka, tj. ograničavanja prolaska plina uz stijenke uzorka. Nanošenjem bočnog tlaka od  $OB = 2,72$  bar zabilježen je znatan pad vrijednosti propusnosti ( $k = 6,1$  mD), no uz minimalno povećanje tlaka  $p_1$  (smeđa linija), propusnost se udvostručuje. Za bočni tlak od  $OB = 4,45$  bar propusnost poprima znatno niže vrijednosti  $k = 0,7$  mD. Očekivano, za najveće vrijednosti bočnog tlaka propusnost je najmanja, uz  $OB = 5,83$  bar  $\rightarrow k = 0,2$  mD. Propusnost pada povećanjem bočnog tlaka uz porast tlaka  $p_1$  što prikazuje iscrtkana plava linija (linija toka vrijednosti). Linija tlaka  $p_1$  služi za ilustraciju porasta vrijednosti, nije u mjerilu.



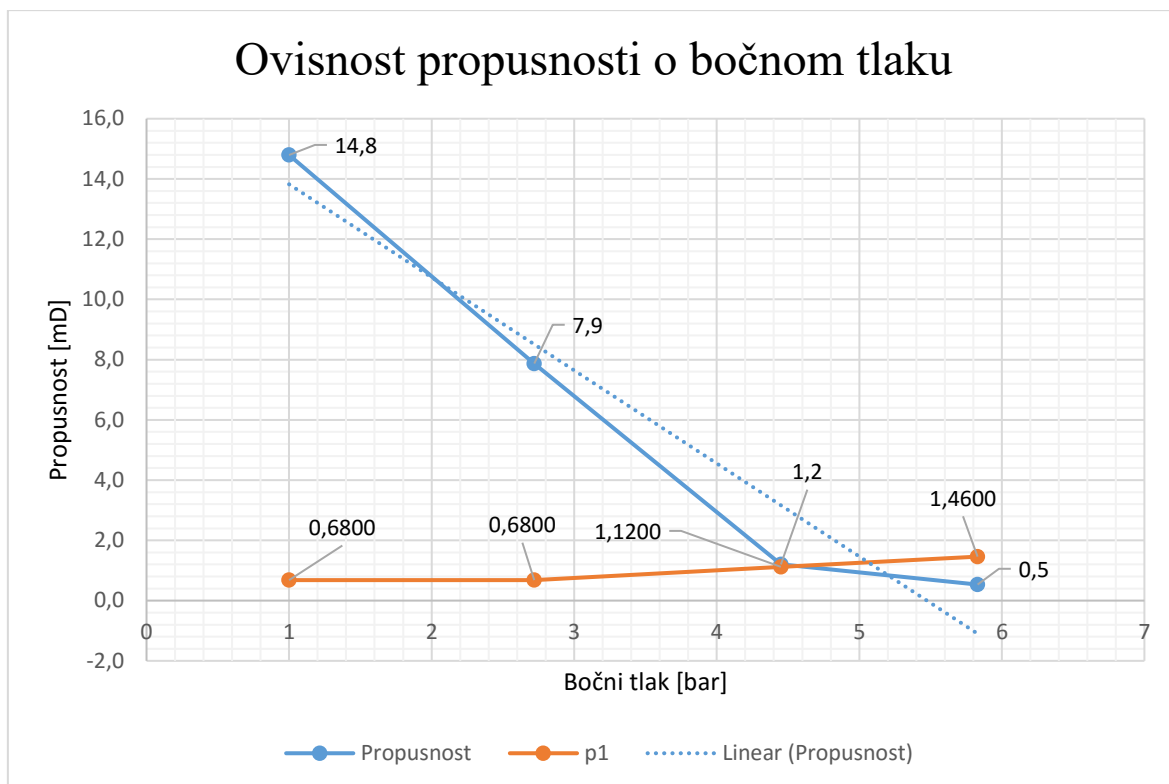
Tablica 4-13. Zapis mjerenja propusnosti, uzorak 9.

<i>broj</i> <i>mjerenja</i>	<i>d</i> <i>cm</i>	<i>l</i> <i>cm</i>	<i>OB</i> <i>psi</i>	<i>p1</i> <i>bar</i>	<i>p2</i> <i>in H<sub>2</sub>O</i>	<i>V</i> <i>cm<sup>3</sup></i>	<i>t</i> <i>s</i>	<i>OB</i> <i>bar (a)</i>	<i>p1</i> <i>Pa</i>	<i>p2</i> <i>Pa</i>	<i>A</i> <i>cm<sup>2</sup></i>	<i>q<sub>2</sub></i> <i>cm<sup>3</sup>/s</i>	<i>P<sub>avg</sub></i> <i>Pa</i>	<i>q</i> <i>cm<sup>3</sup>/s</i>	<i>m</i> <i>Pas</i>	<i>k</i> <i>cm<sup>2</sup></i>	<i>k</i> <i>mD</i>
1	3,79	4,1667	0	0,6800	3	100	49	1,00	169325	102072	11,3	2,0	135699	1,5	0,000017667	1,4894057E-10	15,0914
2	3,79	4,1667	0	0,6800	3	200	102	1,00	169325	102072	11,3	2,0	135699	1,5	0,000017667	1,4309976E-10	14,4996
3	3,79	4,1667	50	1,1200	3	30	88	4,45	213325	102072	11,3	0,3	157699	0,2	0,000017667	1,2941793E-11	1,3113
4	3,79	4,1667	50	1,1200	3	100	353	4,45	213325	102072	11,3	0,3	157699	0,2	0,000017667	1,0754276E-11	1,0897
5	3,79	4,1667	70	1,4600	3	20	100	5,83	247325	102072	11,3	0,2	174699	0,1	0,000017667	5,2494122E-12	0,5319
6	3,79	4,1667	70	1,4600	3	40	200	5,83	247325	102072	11,3	0,2	174699	0,1	0,000017667	5,2494122E-12	0,5319
7	3,79	4,1667	25	0,6800	3	100	96	2,72	169325	102072	11,3	1,0	135699	0,8	0,000017667	7,6021748E-11	7,7029
8	3,79	4,1667	25	0,6800	3	200	184	2,72	169325	102072	11,3	1,1	135699	0,8	0,000017667	7,9327042E-11	8,0378

U tablici 4-13. zelenom bojom označene su izmjerene vrijednosti, a plavom bojom naslovi i izračunate vrijednosti. Mjerenja su podjeljena u nekoliko skupina, ovisno o bočnom tlaku (OB). Ukupno je odrađeno 8 mjerenja na uzorku 9, sa bočnim tlakom 1 bar, 2,72 bar, 4,45 bar i 5,83 bar. U tablici 4-14. vidimo prosječne vrijednosti propusnosti izražene u mD iz kojih podataka je izrađen i graf (slika 4-42.) koji pokazuje međuovisnost prosječne propusnosti u ovisnosti o tlaku p1 (ulazni tlak) i koji prikazuje međuovisnost propusnosti u odnosu na bočni tlak.

Tablica 4-14. Prosječne vrijednosti propusnosti izražene u mD i m<sup>2</sup>.

<i>OB</i>	<i>Prosječni k</i> <i>mD</i>	<i>Prosječni k</i> <i>m<sup>2</sup></i>
<b>1</b>	14,8	1,46020E-14
<b>2,72</b>	7,9	7,76744E-15
<b>4,45</b>	1,2	1,18480E-15
<b>5,83</b>	0,5	5,24941E-16



Slika 4-42. Ovisnost prosječnih vrijednosti propusnosti i bočnog tlaka, uzorak 9.

Međuovisnost propusnosti i bočnog tlaka uzorka 9 prikazana je na slici 4-42. Prikazane vrijednosti ukazuju na utjecaj bočnog tlaka na rezultate propusnosti, povećanjem bočnog tlaka sa 1 na 2,72 bar propusnost se dvosruko smanjuje, dodatnim povećanjem dobivene su još niže vrijednosti, dok su za najveći bočni tlak zabilježene i najmanje vrijednosti propusnosti. Povećanjem tlaka  $p_1$  uz najveći bočni tlak nije zabilježeno povećanje propusnosti u odnosu na ranije mjerenje ( $OB = 4,45$  bar,  $p_1 = 1,1200$  bar). Iscrkana plava linija pokazuje trend vrijednosti propusnosti, vrijednosti opadaju.

Tablica 4-15. Zapis mjerenja propusnosti, uzorak 10.

broj mjerenja	d cm	l cm	OB psi	p1 bar	p2 in H <sub>2</sub> O	V cm <sup>3</sup>	t s	OB bar (a)	p1 Pa	p2 Pa	A cm <sup>2</sup>	q <sub>2</sub> cm <sup>3</sup> /s	P <sub>avg</sub> Pa	q cm <sup>3</sup> /s	m Pas	k cm <sup>2</sup>	k mD
1	3,79	3,98	0	0,0500	3	100	16	1,00	106325	102072	11,3	6,3	104199	6,1	0,000017667	8,9729488E-09	909,1840
2	3,79	3,98	0	0,0500	3	200	33	1,00	106325	102072	11,3	6,1	104199	5,9	0,000017667	8,7010412E-09	881,6330
3	3,79	3,98	25	0,4000	3	30	61	2,72	141325	102072	11,3	0,5	121699	0,4	0,000017667	6,5496962E-11	6,6365
4	3,79	3,98	25	0,4000	3	70	170	2,72	141325	102072	11,3	0,4	121699	0,3	0,000017667	5,4837652E-11	5,5564
5	3,79	3,98	25	0,5000	3	40	50	2,72	151325	102072	11,3	0,8	126699	0,6	0,000017667	8,1559219E-11	8,2640
6	3,79	3,98	25	0,5000	3	90	170	2,72	151325	102072	11,3	0,5	126699	0,4	0,000017667	5,3973013E-11	5,4688
7	3,79	3,98	50	1,0500	3	40	107	4,45	206325	102072	11,3	0,4	154199	0,2	0,000017667	1,4794271E-11	1,4990
8	3,79	3,98	50	1,0500	3	10	22	4,45	206325	102072	11,3	0,5	154199	0,3	0,000017667	1,7988489E-11	1,8227
9	3,79	3,98	50	1,0500	3	30	85	4,45	206325	102072	11,3	0,4	154199	0,2	0,000017667	1,3967533E-11	1,4153
10	3,79	3,98	70	1,5500	3	30	122	5,83	256325	102072	11,3	0,2	179199	0,1	0,000017667	5,6595148E-12	0,5735
11	3,79	3,98	70	1,5500	3	60	243	5,83	256325	102072	11,3	0,2	179199	0,1	0,000017667	5,6828050E-12	0,5758

Tablica 4-16. Zapis mjerenja propusnosti, uzorak11.

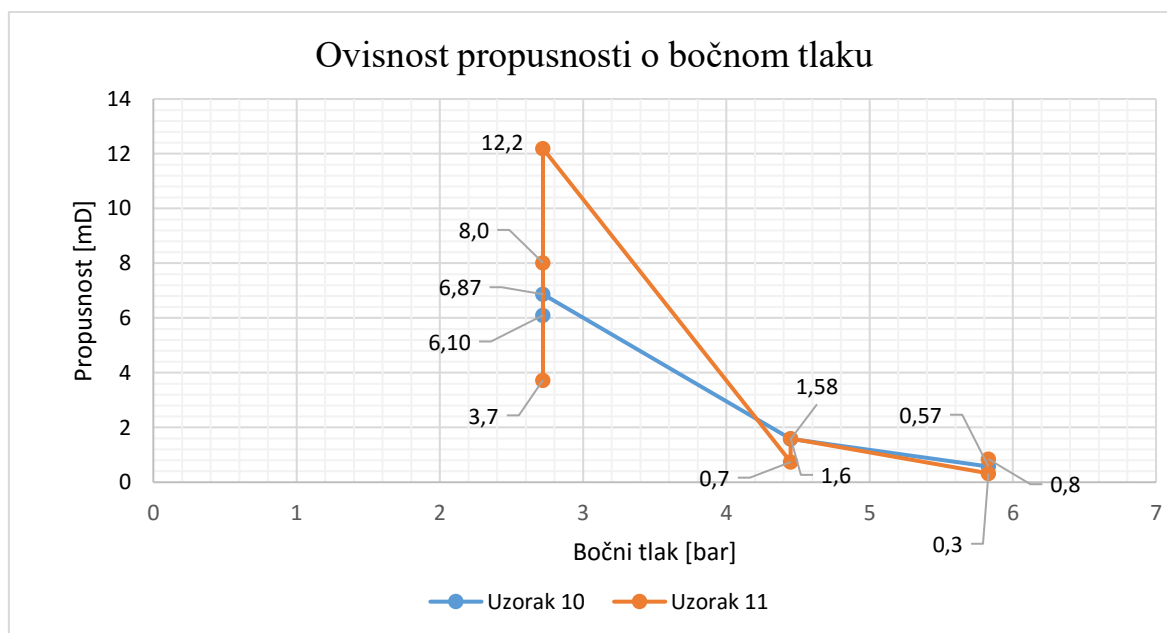
broj mjerenja	d cm	l cm	OB psi	p1 bar	p2 in H <sub>2</sub> O	V cm <sup>3</sup>	t s	OB bar (a)	p1 Pa	p2 Pa	A cm <sup>2</sup>	q <sub>2</sub> cm <sup>3</sup> /s	P <sub>avg</sub> Pa	q cm <sup>3</sup> /s	m Pas	k cm <sup>2</sup>	k mD
1	3,79	3,99	0	0,2000	3	300	51	1,00	121325	102072	11,3	5,9	111699	5,4	0,000017667	1,7445603E-09	176,7676
2	3,79	3,99	0	0,2000	3	500	84,2	1,00	121325	102072	11,3	5,9	111699	5,4	0,000017667	1,7611357E-09	178,4471
3	3,79	3,99	0	0,0450	3	40	134	1,00	105825	102072	11,3	0,3	103949	0,3	0,000017667	4,8804950E-10	49,4516
4	3,79	3,99	0	0,0450	3	60	201	1,00	105825	102072	11,3	0,3	103949	0,3	0,000017667	4,8804950E-10	49,4516
5	3,79	3,99	25	0,4500	3	80	239	2,72	146325	102072	11,3	0,3	124199	0,3	0,000017667	3,8842782E-11	3,9357
6	3,79	3,99	25	0,4500	3	100	318	2,72	146325	102072	11,3	0,3	124199	0,3	0,000017667	3,6491450E-11	3,6975
7	3,79	3,99	25	0,4500	3	120	397	2,72	146325	102072	11,3	0,3	124199	0,2	0,000017667	3,5075913E-11	3,5541
8	3,79	3,99	25	0,6000	3	60	61	2,72	161325	102072	11,3	1,0	131699	0,8	0,000017667	8,0390906E-11	8,1456
9	3,79	3,99	25	0,6000	3	100	105	2,72	161325	102072	11,3	1,0	131699	0,7	0,000017667	7,7838813E-11	7,8870
10	3,79	3,99	25	0,7300	3	50	27	2,72	174325	102072	11,3	1,9	138199	1,4	0,000017667	1,1828328E-10	11,9851
11	3,79	3,99	25	0,7300	3	100	53	2,72	174325	102072	11,3	1,9	138199	1,4	0,000017667	1,2051504E-10	12,2112
12	3,79	3,99	25	0,7300	3	130	68	2,72	174325	102072	11,3	1,9	138199	1,4	0,000017667	1,2211010E-10	12,3728
13	3,79	3,99	50	1,0500	3	20	109	4,45	206325	102072	11,3	0,2	154199	0,1	0,000017667	7,2796531E-12	0,7376
14	3,79	3,99	50	1,0500	3	40	217	4,45	206325	102072	11,3	0,2	154199	0,1	0,000017667	7,3131999E-12	0,7410
15	3,79	3,99	50	1,2200	3	40	82	4,45	223325	102072	11,3	0,5	162699	0,3	0,000017667	1,5770514E-11	1,5979
16	3,79	3,99	50	1,2200	3	80	164	4,45	223325	102072	11,3	0,5	162699	0,3	0,000017667	1,5770514E-11	1,5979
17	3,79	3,99	70	1,5600	3	120	919	5,83	257325	102072	11,3	0,1	179699	0,1	0,000017667	2,9850861E-12	0,3025
18	3,79	3,99	70	1,5600	3	80	542	5,83	257325	102072	11,3	0,1	179699	0,1	0,000017667	3,3742856E-12	0,3419
19	3,79	3,99	70	1,5600	3	100	702	5,83	257325	102072	11,3	0,1	179699	0,1	0,000017667	3,2565220E-12	0,3300
20	3,79	3,99	70	1,8200	3	80	181	5,83	283325	102072	11,3	0,4	192699	0,2	0,000017667	8,0709262E-12	0,8178
21	3,79	3,99	70	1,8200	3	140	303	5,83	283325	102072	11,3	0,5	192699	0,2	0,000017667	8,4371811E-12	0,8549
22	3,79	3,99	70	1,8200	3	240	517	5,83	283325	102072	11,3	0,5	192699	0,2	0,000017667	8,4768142E-12	0,8589

Tablice 4-15. i 4-16. prikazuju mjerene vrijednosti propusnosti uzoraka 10 i 11. Mjerene vrijednosti označene su zelenom bojom, a naslovi i izračunate vrijednosti plavom. Mjereno je pri različitim bočnim tlakovima i tlakovima  $p_1$ . Ovisno o bočnim tlakovima dobivene su različite vrijednosti propusnosti, na koju utječe i tlak  $p_1$ , no ne u tolikoj mjeri kao bočni tlak (OB). Ukupno je odrađeno 11 mjerenja na uzorku 10 i 22 mjerenja na uzorku 11. Razlog povećanog broja mjerenja je pokušaj prepoznavanja uzorka, tj. utjecaj bočnog tlaka na propusnost. Prosječne vrijednosti propusnosti uzoraka 10 i 11 prikazane su u tablici 4-17.

Tablica 4-17. Prosječne vrijednosti propusnosti uzoraka 10 i 11.

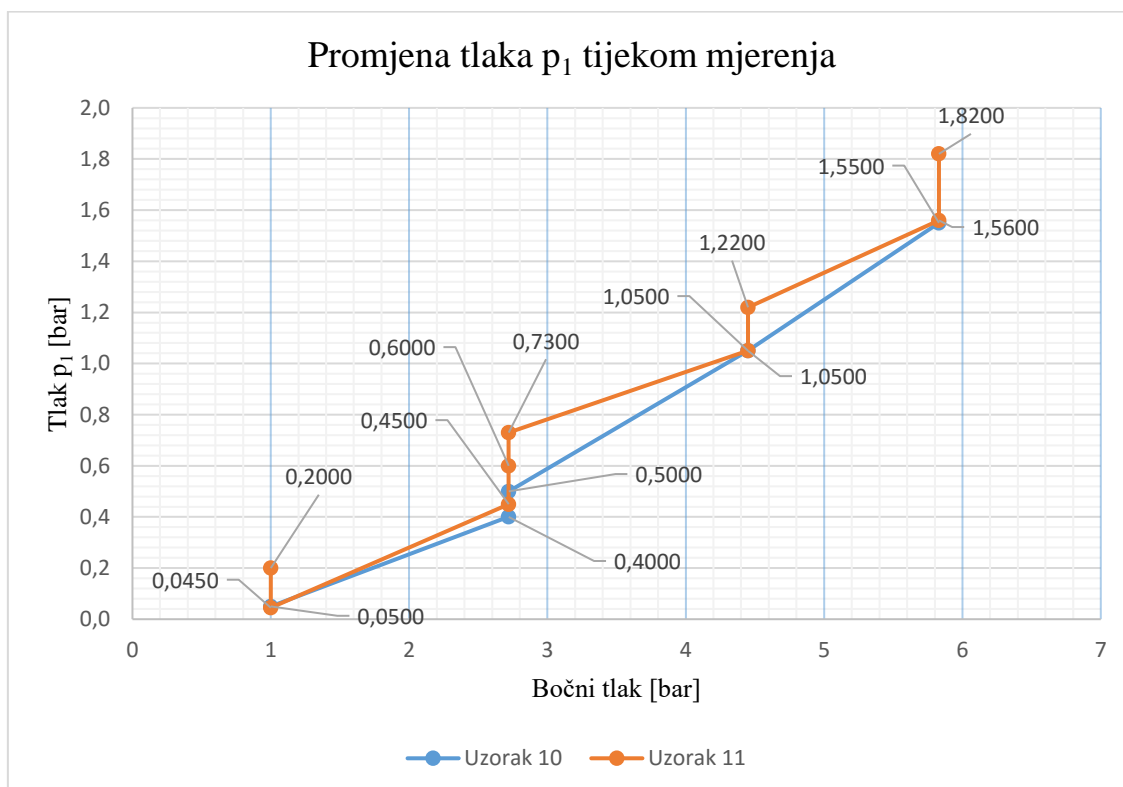
uzorak 10			uzorak 11		
OB	Prosječni k mD	Prosječni k m2	OB	prosječni k mD	Prosječni k m2
1	895,41	8,837E-13	1	177,6	1,75285E-13
2,72	6,10	6,01673E-15	1	49,5	4,88050E-14
2,72	6,87	6,77661E-15	2,72	3,7	3,68034E-15
4,45	1,58	1,55834E-15	2,72	8,0	7,91149E-15
5,83	0,57	5,67116E-16	2,72	12,2	1,20303E-14
-	-	-	4,45	0,7	7,29643E-16
-	-	-	4,45	1,6	1,57705E-15
-	-	-	5,83	0,3	3,20530E-16
-	-	-	5,83	0,8	8,32831E-16

Graf (slika 4-43.) prikazuje međuovisnost prosječne propusnosti u odnosu na bočni tlak, prikazane su vrijednosti uzorka 10 i uzorka 11.



Slika 4-43. Prosječne vrijednosti propusnosti u ovisnosti o bočnom tlaku, uzorci 10 i 11.

Graf (slika 4-44.) prikazuje porast tlaka  $p_1$  u odnosu na bočni tlak. Porast tlaka  $p_1$  bitan je zbog promjene vrijednosti propusnosti za iste bočne tlakove.



Slika 4-44. Grafički prikaz promjene tlaka  $p_1$  tijekom mjerenja.

Usporedbom grafova (slika 4-43. i 4-44.) može se primjetiti slično “ponašanje” rezultata mjerenja. Povećanjem tlaka  $p_1$  i povećanjem bočnog tlaka zabilježene su niže vrijednosti propusnosti uzoraka. Razlog tome je postizanje uvjeta mjerenja gdje ne dolazi do „bježanja“ plina uz stijenke uzorka, niti do loma uzorka uslijed nanošenja prevelikih bočnih opterećenja.

Na posljednjem uzorku (uzorak 12) napravljeno je 28 mjerenja. Zapise mjerenja vidimo u tablici 4-18.. Uzorak je podvrgnut najvećem broju mjerenja pri najviše različitih parametara, te se pojavljuju nove vrijednosti bočnog tlaka 1,69, 1,86, 5,14 bar. U prvim mjerenjima, bez bočnog tlaka, zabilježene su vrlo visoke vrijednosti propusnosti što je razlog malog broja mjerenja bez bočnog tlaka. Postepenim povećanjem bočnog tlaka zabilježen je nagli pad vrijednosti propusnosti, kao kod ostalih uzoraka. Usprkos prvobitnom padu vrijednosti uslijed  $OB = 1,69$  bar, porast vrijednosti tlaka  $p_1$  uzrokuje visoke vrijednosti propusnosti. Visoke vrijednosti  $k$  se pripisuju nedovoljnom bočnom tlaku, tj. prolasku plina uz stijenke uzorka, te je odlučeno dodatno povećati bočni tlak. Posebnost ovog mjerenja je u dodatnim vrijednostima bočnih tlakova u odnosu na ranija mjerenja.

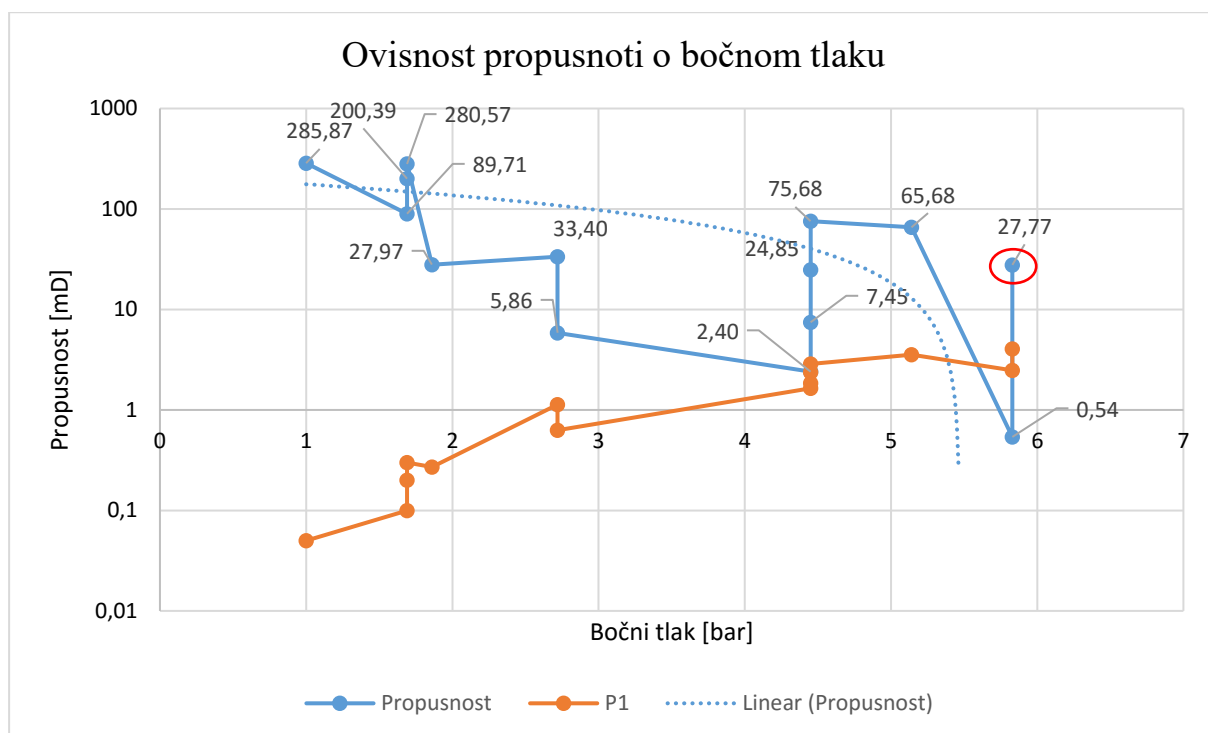
Tablica 4-18. Zapis mjerenja propusnosti, uzorak 12.

broj mjerenja	d cm	l cm	OB psi	p1 bar	p2 in H <sub>2</sub> O	V cm <sup>3</sup>	t s	OB bar (a)	p1 Pa	p2 Pa	A cm <sup>2</sup>	q <sub>2</sub> cm <sup>3</sup> /s	P <sub>avg</sub> Pa	q cm <sup>3</sup> /s	m Pas	k cm <sup>2</sup>	k mD
1	3,78	3,97	0	0,0500	3	250	128	1,00	106325	102072	11,2	2,0	104199	1,9	0,000017667	2,8118197E-09	284,9076
2	3,78	3,97	0	0,0500	3	350	178	1,00	106325	102072	11,2	2,0	104199	1,9	0,000017667	2,8307758E-09	286,8284
3	3,78	3,97	10	0,1000	3	50	36	1,69	111325	102072	11,2	1,4	106699	1,3	0,000017667	8,9748293E-10	90,9375
4	3,78	3,97	10	0,1000	3	100	74	1,69	111325	102072	11,2	1,4	106699	1,3	0,000017667	8,7322664E-10	88,4797
5	3,78	3,97	10	0,2000	3	100	15	1,69	121325	102072	11,2	6,7	111699	6,1	0,000017667	1,9776803E-09	200,3885
6	3,78	3,97	10	0,2000	3	200	30	1,69	121325	102072	11,2	6,7	111699	6,1	0,000017667	1,9776803E-09	200,3885
7	3,78	3,97	10	0,3000	3	300	20	1,69	131325	102072	11,2	15,0	116699	13,1	0,000017667	2,8031519E-09	284,0294
8	3,78	3,97	10	0,3000	3	600	41	1,69	131325	102072	11,2	14,6	116699	12,8	0,000017667	2,7347823E-09	277,1018
9	3,78	3,97	12,5	0,2700	3	200	153	1,86	128325	102072	11,2	1,3	115199	1,2	0,000017667	2,7574288E-10	27,9396
10	3,78	3,97	12,5	0,2700	3	300	229	1,86	128325	102072	11,2	1,3	115199	1,2	0,000017667	2,7634494E-10	28,0007
11	3,78	3,97	25	1,1300	3	200	22	2,72	214325	102072	11,2	9,1	158199	5,9	0,000017667	3,2658427E-10	33,0912
12	3,78	3,97	25	1,1300	3	500	54	2,72	214325	102072	11,2	9,3	158199	6,0	0,000017667	3,3263212E-10	33,7039
13	3,78	3,97	25	0,6300	3	30	39	2,72	164325	102072	11,2	0,8	133199	0,6	0,000017667	5,9181511E-11	5,9966
14	3,78	3,97	25	0,6300	3	50	68	2,72	164325	102072	11,2	0,7	133199	0,6	0,000017667	5,6570562E-11	5,7320
15	3,78	3,97	50	1,6400	3	200	181	4,45	265325	102072	11,2	1,1	183699	0,6	0,000017667	2,3505670E-11	2,3817
16	3,78	3,97	50	1,6400	3	370	329	4,45	265325	102072	11,2	1,1	183699	0,6	0,000017667	2,3923628E-11	2,4241
17	3,78	3,97	50	1,8500	3	100	24	4,45	286325	102072	11,2	4,2	194199	2,2	0,000017667	7,4287586E-11	7,5272
18	3,78	3,97	50	1,8500	3	200	49	4,45	286325	102072	11,2	4,1	194199	2,1	0,000017667	7,2771512E-11	7,3736
19	3,78	3,97	50	2,3700	3	500	25	4,45	338325	102072	11,2	20,0	220199	9,3	0,000017667	2,4525966E-10	24,8509
20	3,78	3,97	50	2,3700	3	1000	50	4,45	338325	102072	11,2	20,0	220199	9,3	0,000017667	2,4525966E-10	24,8509
21	3,78	3,97	50	2,8600	3	1500	18,6	4,45	387325	102072	11,2	80,6	244699	33,6	0,000017667	7,3706290E-10	74,6829
22	3,78	3,97	50	2,8600	3	3080	37,2	4,45	387325	102072	11,2	82,8	244699	34,5	0,000017667	7,5671791E-10	76,6744
23	3,78	3,97	70	2,4800	3	30	65	5,83	349325	102072	11,2	0,5	225699	0,2	0,000017667	5,2762512E-12	0,5346
24	3,78	3,97	70	2,4800	3	60	128	5,83	349325	102072	11,2	0,5	225699	0,2	0,000017667	5,3586926E-12	0,5430
25	3,78	3,97	70	4,0500	3	1000	19,6	5,83	506325	102072	11,2	51,0	304199	17,1	0,000017667	2,6468011E-10	26,8187
26	3,78	3,97	70	4,0500	3	2000	36,6	5,83	506325	102072	11,2	54,6	304199	18,3	0,000017667	2,8348252E-10	28,7239
27	3,78	3,97	60	3,5500	3	1005	10	5,14	456325	102072	11,2	100,5	279199	36,7	0,000017667	6,4822706E-10	65,6816
28	3,78	3,97	60	3,5500	3	2010	20	5,14	456325	102072	11,2	100,5	279199	36,7	0,000017667	6,4822706E-10	65,6816

Tablica 4-19. Prosječne vrijednosti propusnosti izražene u mD i m<sup>2</sup>.

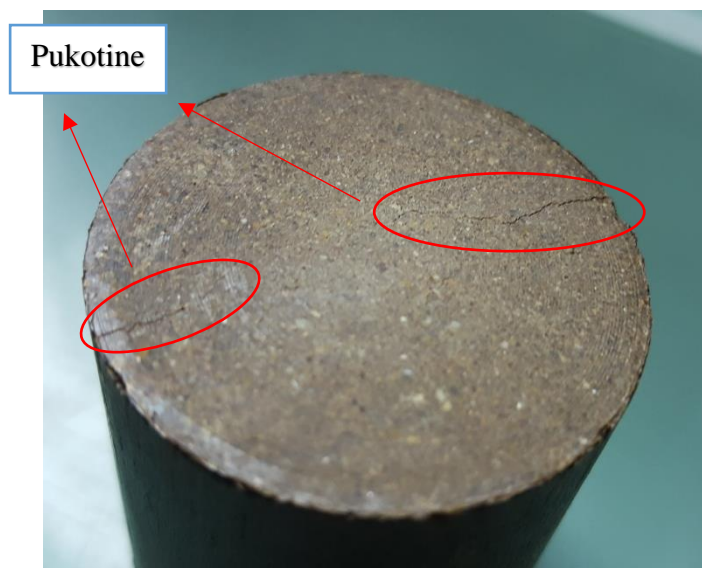
OB	Prosječni k mD	Prosječni k m <sup>2</sup>	OB	Prosječni k mD	Prosječni k m <sup>2</sup>	OB	Prosječni k mD	Prosječni k m <sup>2</sup>
1	285,9	2,82130E-13	2,72	33,4	3,29608E-14	4,45	75,7	7,46890E-14
1,69	89,7	8,85355E-14	2,72	5,9	5,78760E-15	5,83	0,5	5,31747E-16
1,69	200,4	1,97768E-13	4,45	2,4	2,37146E-15	5,83	27,8	2,74081E-14
1,69	280,6	2,76897E-13	4,45	7,5	7,35295E-15	5,14	65,7	6,48227E-14
1,86	28,0	2,76044E-14	4,45	24,9	2,45260E-14			

Tablica 4-19. prikazuje prosječne vrijednosti propusnosti u odnosu na bočni tlak, spomenute vrijednosti korištene su za izradu grafa (slika 4-45.). Na grafu je vidljiva raspodjela propusnosti u ovisnosti o bočnom tlaku, i iz čega je moguće izvesti već otprije poznati zaključak; bočni tlak najviše utječe na mjerenja propusnosti, no vrijednosti tlaka  $p_1$  pri malim bočnim tlakovima nisu zanemariv čimbenik!



Slika 4-45. Ovisnost prosječnih vrijednosti propusnosti o bočnom tlaku, uzorak 12.

Generalno se može ustanoviti da se vrijednosti propusnosti smanjuju povećanjem bočnog tlaka, što prikazuje iscrtkana plava linija (linija toka vrijednosti). Tijekom mjerenja zabilježen je stalni pad vrijednosti propusnosti prilikom povećanja bočnog tlaka, čemu je razlog (na višim vrijednostima OB) prolazak plina isključivo kroz uzorak. Također je bitno naglasiti da usprkos povećanju bočnog tlaka prilikom zadnjeg mjerenja pri najvećem bočnom tlaku dolazi do naglog skoka vrijednosti (crveni kružić). Prilikom relativno malog povećanja tlaka  $p_1$  dolazi do višestrukog povećanja vrijednosti propusnosti (50 puta). Razlog tome je pojava pukotine na uzorku (slika 4-46.). Iz rezultata mjerenja može se sigurnošću reći da se pukotina pojavljuje uslijed visokog tlaka  $p_1$  (4 bar), tj. ekstremna vrijednost ulaznog tlaka frakturira uzorak.



Slika 4-46. Pukotine uzrokovane maksimalnim ulaznim tlakom, uzorak 12.

#### 4.3.2.2 Analiza izmjerenih vrijednosti propusnosti

Kako bi se konačno utvrdila vrijednosti poroznosti uzoraka, odabiru se mjerenja s najvišim bočnim tlakovima (5,83 bar) i sličnim vrijednostima ulaznih tlakova. Tablica 4-20. prikazuje odabrane izmjerene vrijednosti uzoraka. Raspon vrijednosti tlaka  $p_1$  u rasponu je 1,46 – 1,56 bar uz najviše mjerenja u području od 1,55 bar.

Tablica 4-20. Vrijednosti  $p_1$  i OB u svrhu konačnog određivanja propusnosti.

uzorak 7			uzorak 8			uzorak 9		
k mD	OB bar	$p_1$ bar	k mD	OB bar	$p_1$ bar	k mD	OB bar	$p_1$ bar
0,417879	5,83	1,55	0,228065	5,83	1,55	0,531897	5,83	1,46
0,434007	5,83	1,55	0,203804	5,83	1,55	0,531897	5,83	1,46
0,441757	5,83	1,55	-	-	-	-	-	-
uzorak 10			uzorak 11			Uzorak 12		
k mD	OB bar	$p_1$ bar	k mD	OB bar	$p_1$ bar	k mD	OB bar	$p_1$ bar
0,57345	5,83	1,55	0,302464	5,83	1,56	0,534616	5,83	2,48
0,57581	5,83	1,55	0,341899	5,83	1,56	0,54297	5,83	2,48
-	-	-	0,329967	5,83	1,56	26,81871	5,83	4,05
-	-	-	-	-	-	28,72387	5,83	4,05

Prikazane vrijednosti u gornjoj tablici obojane zeleno predstavljaju vrijednosti  $p_1$  koje ulaze u proračun za računanje propusnosti, razlog je uniformnost mjerenja. Svi uzorci tlačeni



su istim bočnim tlakom, no razlike postoje u ulaznom tlaku, što nije slučaj za uzorak 12. Mjerenja uzorka 12 izbačena su iz kalkulacije zbog visokih ulaznih tlakova koji dodatno utječu na propusnost uzorka, te zbog jednostavnosti proračuna. Prosječna vrijednost propusnosti uzoraka 7 – 12 iznosi 0,4094 mD. Vrijednost  $k_{sr} = 0,4094$  mD ne govori puno bez usporedbe vrijednosti propusnosti prirodnih materijala. Za lakše razumijevanje bitno je napomenuti kako se osim u mD propusnost vrlo često u literaturi izražava u  $\mu\text{m}^2$ .  $1 \text{ mD} = 9.86 \times 10^{-16} \text{ m}^2 = 9.86 \times 10^{-4} \mu\text{m}^2$  (Zornjak, 2009.), prema toj jednadžbi propusnost naših uzoraka iznosi  $4,037 \times 10^{-4} \mu\text{m}^2 = 40,37 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ .

Tablica 4-21. Raspon propusnosti ležišnih stijena, modificirano iz (Zornjak, 2009.).

Raspon propusnosti ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	Vrsta kolektora	Stratigrafska pripadnost	Depresija	Naftno polje
0,1 - 25,7	Breča, pješčenjaka, vulkanske stijene	Baden	Dravska	Crnac
0,05 - 0,25	Pješčenjaci, breča, gabro, metamorfit	Miocen (temeljno gorje)	Dravska	Pavljani
2,0 – 336,0	Pijesci, pješčenjaci	D. pont	Dravska	Šandrovac
<b>14,6 – 79,6</b>	<b>Pješčenjaka</b>	<b>Miocen</b>	<b>Savska</b>	<b>Ivanić</b>
2,1 – 410,6	Pješčenjaka	Miocen	Savska	Lipovljani
1,3 – 24,8	Pješčenjaka	Miocen	Savska	Okoli

Iz gornje tablice (4-21.) vidljivo je da naši uzorci sa propusnošću  $k = 40,37 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  odgovaraju propusnosti ležišnih stijena Savske i Dravske depresije, tj. propusnosti pješčenjaka. Zbog vrlo velikog raspona vrijednosti propusnosti pješčenjaka za uzorke se smatra da pripadaju donjoj granici, tj. ponašaju se kao manje propusni pješčenjaci savske/ dravske depresije u ležišnim uvjetima.

## 5. Rasprava

Od ideje za istraživanje do realizacije ispitivanja prošlo je oko 6 mjeseci. Isprva su problem predstavljala tehnička rješenja i zadovoljavanje normi, kao što je objašnjeno ranije u tekstu. Poseban izazov predstavljalo je dobivanje reprezentativnih uzoraka, što je moguće sličnijih. Osim tehničkih problema bitan aspekt predstavljaju i financije. Ovaj rad je bio financiran sa 500,00 HRK od strane RGNf-a i bez pomoći tvrtke Hidraulika – centar j.d.o.o., tvrtke Geokon – Zagreb d.d., ne bi mogao biti realiziran. Financijski aspekt je spomenut iz razloga transparentnosti i buduće evaluacije rada.

### 5.1 Tehnički problemi

- Prešanje uzoraka

Cilj rada je ispitati prešane uzorke bentonitne gline, pa ih je u tu svrhu bilo potrebno i pripremiti. Prema uzoru na ispitivanje SKB-a, korištene su određene sile kako bi se ostvarili određeni tlakovi (poglavlje 4.1.2.1 i 4.1.2.2). Uzorci su prešani u 2 kalupa prilikom čega se javljaju određeni problemi. Nakon pripreme 4 uzorka kalup 1 postaje potpuno nefunkcionalan, klip zaglavljuje u kalupu uslijed izmicanja iz vertikalne osi (slika 4-10.). Korištenje ovakvog tipa kalupa se ne preporuča u daljnjim ispitivanjima iz navedenih razloga. Naime, čestice gline su toliko sitne da ulaze u prostor između klipa i unutarnjeg dijela plašta kalupa i naposljetku uzrokuju izmicanje klipa iz osi, tj. brazdanje klipa po unutarnjem dijelu kalupa, zaglavljivanje i uništavanje kalupa. Odlučujemo se za rješenje prikazanom kalupom 2 (slika 4-5.). Ideja je otvaranje kalupa nakon prešanja i vađenje uzorka bez izlaganja dodatnim naprezanjima. Nažalost, pretpostavka vađenja uzorka nakon prešanja otvaranjem pokazala se pogrešnom. Uzorak se uslijed tendencije bočnom širenju “lijepi” za unutarnji dio plašta kalupa te uzrokuje vlačna naprezanja prilikom otvaranja i lomi uzorak po ravnini otvaranja (4-13.).

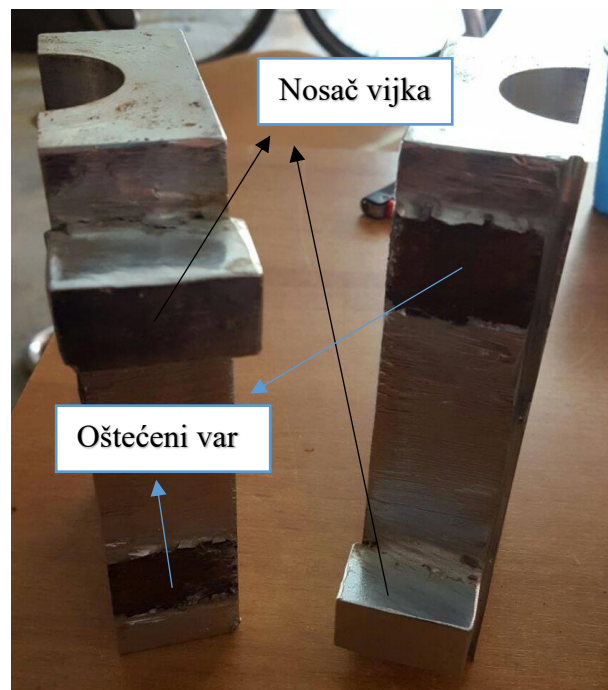
- Vađenje uzoraka iz kalupa

Uzorci iz kalupa 1 vađeni su istiskivanjem pomoću hidrauličnog ekstrudera. Nakon otkrivanja problema s vađenjem uzoraka iz kalupa 2, tj. pucanja uzoraka i kod kalupa 2 kao rješenje nameće se istiskivanje. Problem kod istiskivanja je prazna površina koja je morala biti osigurana kako bi uzorak mogao biti istisnut. Ovaj problem je riješen izradom

cilindričnog šupljeg nosača vidljivog na slici 4-14. Zbog visine nosača, na dno je postavljena vata kako uzorci koji se istiskuju ne bi bili oštećeni prilikom pada sa visine od 7 cm.

- Čvrstoća kalupa

Prilikom prešanja, svrha kalupa je onemogućiti bočno širenje uzorku. Prilikom obnašanja te zadaće, kalup biva izložen naprezanima u smjeru osi vijaka, tj. u smjeru bočnog širenja uzorka. Nosači vijaka kalupa moraju biti pravilno dimenzionirani, tj. spojevi nosača i plašta kalupa. Slika 5-1. prikazuje puknuće vara nosača uslijed prevelikih naprezanja, tj. pogrešnog dimenzioniranja vara. Puknuće se desilo tlačenjem uzorka silom od 70 kN. Kalup je bilo potrebno ponovno variti uz uvjet da se ne poremeti pozicija unutarnjeg dijela plašta, tj. izgled uzorka.



Slika 5-1. Puknuće vara nosača vijaka za spajanje kalupa.

## 5.2 Prijedlog nastavka istraživanja

Ispitivanja propusnosti uz koje je usko vezana i efektivna poroznost neka su od najbitnijih ispitivanja prešane bentonitne gline u svrhu ugrađivanja u odlagalište VRAO ili ING po takozvanom “švedskom modelu”. Povezanost pora i propusnost materijala bitni su parametri zbog mogućeg protjecanja radionuklida uslijed oštećenja spremnika koji primarno štite. Ispitivanja provedena u ovom radu potrebno je nadograditi i proširiti.

Ponajprije se može navesti upotreba numeričkog modeliranja, npr. računalnog programa Plaxis, za što u ovom radu nije bilo dovoljno vremena. Potrebno je izraditi numerički model spomenutih slojeva gline. Usporedba numeričkog modela sa stvarnim ispitivanjima donosi nove vrijednosti te omogućava korekciju mjerenih rezultata.

Osim numeričkog modeliranja, potrebno je ispitati uzorke gline s nekoliko različitih udjela vode u uzorku. Preporuča se ispitivanje potpuno suhe gline čije vrijednosti kasnije možemo upotrijebiti kao nulte vrijednosti parametara propusnosti, jednoosne tlačne čvrstoće i poroznosti. Pomoću nultih vrijednosti, te dodatnih ispitivanja pri vlažnostima od 10%, 15%, 20%, 25%, 50% i 100% otvara se mogućnost predviđanja spomenutih parametara. Prilikom ugradnje gline u odlagalište često dolazi do promjene vlažnosti materijala. Promjenom vlažnosti mijenjaju se parametri čvrstoće, permeabilnosti i poroznosti. Dodatnim ispitivanjima bilo bi moguće, za gotovo svaku vlažnost, ekstrapolacijom utvrditi spomenute parametre.

Svojstvo bubrivosti natrijskih bentonita nameće pitanje tlaka bubrenja. Vlažno podzemlje mijenja vlažnost gline prema višim vrijednostima zasićenosti vodom. Tlak bubrenja mogao bi se pojaviti kao potencijalni problem nakon ugradnje materijala. Postoji mogućnost tlačenja spremnika koji je materijal inicijalno štitio. Kolike su vrijednosti tlakova bubrenja? Povećavaju li se s vremenom? Bubri li glina odjednom ili tlačna naprežanja na spremnik prenosi postepeno? Na svako od ovih pitanja bitno je odgovoriti prilikom dimenzioniranja spremnika. Pretpostavka da spremnik mora biti otporan na tlak (engl. load bearing) ne govori dovoljno. Moralo bi se eksplicitno znati ekstremne vrijednosti koje se mogu očekivati, te ih sa određenim faktorom sigurnosti ukalkulirati u dimenzioniranje spremnika.

## 6. Zaključak

Radom je predstavljen švedski model odlaganja visoko radioaktivnog otpada u vertikalne bušotine (KBS – 3V). Odabran je specifikum odlagališta, tj. predviđeni tamponski sloj prešanog natrij bentonita na kojemu su rađena ispitivanja propusnosti, poroznosti i jednoosne tlačne čvrstoće.

### Jednoosna tlačna čvrstoća

U svrhu ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće različitim silama su prešani uzorci bentonitne gline, 50 kN, 100 kN i 200 kN. Za svaku silu predviđeno je po 2 uzorka koji se razlikuju po broju slojeva. Prva skupina uzoraka su uzorci zbijani u jednom sloju, dok drugu predstavljaju četveroslojni uzorci. Prilikom pripremanja uzoraka dolazi do tehničkih problema ( poglavlje 4.1.2.1.), uspješno su pripremljeni svi jednoslojni uzorci i četveroslojni uzorak koristeći silu od 50 kN. Svi dobiveni uzorci su podvrgnuti ispitivanju.



Slika 6-1. Jednoosna tlačna čvrstoća, nekih stijena i glina.

Slika 6-1. Grafički prikazuje usporedbu dobivenih rezultata s vrijednostima maksimalnih naprezanja nekih stijena prema (Hudson, 1989.) i nekih glina prema (ISRM, 1978.). Vidljivo je da ispitani uzorci imaju višestruko manju jednoosnu tlačnu čvrstoću, tj. maksimalno naprezanje od predstavljenih stijena. U usporedbi s glinama uzorci pokazuju povećanu čvrstoću, čak i u odnosu na tvrde gline. Već za najmanje vrijednosti primjenjene sile (50 kN) dobiveni su rezultati koji pokazuju povećanje jednoosne tlačne čvrstoće. Eksperiment zbijanja gline uspio je u pogledu povećanja čvrstoće materijala.

### Propusnost i poroznost

Ispitivanja propusnosti i poroznosti rađena su na istim uzorcima. Uzorci su prešani istim silama, te su podjeljeni u dvije skupine. Prva skupina uzoraka su uzorci zbijani u jednom sloju, dok drugu skupinu predstavljaju uzorci zbijani u dva sloja. Ukupno je izrađeno 6 uzoraka, po 3 uzorka iz svake skupine. Ispitivanje propusnosti uzoraka prethodilo je ispitivanju poroznosti.

Propusnost uzoraka ovisila je uvelike o bočnom tlaku (OB). Ispitivanja uzoraka bez bočnog tlaka davala su ekstremne vrijednosti propusnosti, te se kao takva odbacuju uz pretpostavku da je nepostojanje bočnog tlaka uzrok prolasku plina uz stijenke uzorka i bilježenju takvih vrijednosti. Povećanjem bočnog tlaka utvrđena je ovisnost bočnog tlaka o propusnosti uz utjecaj ulaznog tlaka  $p_1$ . Nakon nekoliko mjerenja odabrane su vrijednosti propusnosti, tj. parametri pri kojima mjerimo propusnost uzoraka (tablica 4-20.), te je izračunata srednja vrijednost koja postaje vrijednost propusnosti uzoraka. Propusnost pripremljenih uzoraka je  $40,37 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 = 0,4094 \text{ mD}$ . Nakon usporedbe mjerenih vrijednosti s literaturnim vrijednostima propusnosti ležišnih stijena, zaključeno je da spomenuti uzorci imaju propusnost ležišnih stijena Savske i Dravske depresije, tj. propusnosti pješčenjaka Savske i Dravske depresije.

Na istim uzorcima je nakon propusnosti mjerena poroznost. Metoda mjerenja je helijska porozimetrija. Metoda je detaljnije opisana u poglavlju 4.3.1. Izmjerene vrijednosti poroznosti uzoraka variraju od 14,1% za dvoslojne uzorke do 23,4% za jednoslojne uzorke. Očekivane vrijednosti poklapaju se s izmjeranima, tj. dvoslojni uzorci uslijed veće zbijenosti imaju manju poroznost, dok se jednoslojni uzorci nalaze na donjoj granici tipičnih vrijednosti poroznosti glina (tablica 4-8.). Vrijednosti poroznosti dvoslojnih uzoraka manje su od vrijednosti poroznosti jednoslojnih, čime takvi uzorci postaju prikladniji za ugradnju u odlagališta ING.

Bentonitna glina zbijana je po uzoru na (Eriksson, 2014). Vrijednosti tlaka, vrijeme održavanja maksimalnih vrijednosti te oblik uzoraka, u znatno manjem mjerilu, preuzeti su također od spomenutog autora. Bitno je naglasiti da je ispitivanje provedeno s bitno manjom financijskom podrškom. Ispitani materijal s izmjerenim vrijednostima jednoosne tlačne čvrstoće, propusnosti i poroznosti zadovoljava kriterije koji mu se postavljaju prilikom ugrađivanja u KBS – 3V odlagalište, a to su relativno visoka čvrstoća, vrlo mala propusnost i mala poroznost. Zadovoljavanje kriterija odražava se na razinu sigurnosti odlagališta, tj. smanjuje rizik od potencijalnih nesreća uzrokovanih ljudskom pogreškom, strojevima ili prirodnim procesima.

## 7. Literatura

Arvidsson, A. i dr., 2015.. *System design of backfill - Project results*, Stockholm : Svensk Kärnbränslehantering AB.

Bačani, A., 2006.. *Hidrogeologija I*. Zagreb: RGNf.

Baldwin, T., Chapman, N. & Neall, F., 2008.. *Geological disposal options for high-level waste and spent fuel*, s.l.: UK Nuclear Decommissioning Authority.

Blažević, M., 2007.. *Labaratorijsko ispitivanje koeficijenta propusnosti bentonitnog tepiha*. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

Domitrović, D., 2012.. *UTJECAJ BUBRENJA BENTONITNE GLINE NA NJEZINA MEHANIČKA SVOJSTVA*. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

Domitrović, D., Vučenović, H. & Kovačević - Zelić, B., 2012.. *ISPITIVANJE SVOJSTAVA BENTONITA KAO INŽENJERSKE BARIJERE U ODLAGALIŠTIMA RADIOAKTIVNOG OTPADA*. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, pp. 19-27.

Eriksson, P., 2014.. *Basic engineering of buffer production system*, Stockholm : Svensk Kärnbränslehantering AB.

European nuclear society, 2016.. *European nuclear society*. [Mrežno]  
Available at: <https://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/n/nuclear-power-plant-europe.htm>

[Pokušaj pristupa 18. 8. 2016.].

Fond za financiranje razgradnje i zbrinjavanja RAO i ING Nuklearne elektrane Krško, 2016.. *Radioaktivniotpad.org*. [Mrežno]

Available at: <http://radioaktivniotpad.org/radioaktivni-otpad/>

[Pokušaj pristupa 05. 06. 2016.].

Fond za financiranje razgradnje i zbrinjavanja RAO i ING Nuklearne elektrane Krško, 2016.. *Radioaktivniotpad.org*. [Mrežno]

Available at: <http://radioaktivniotpad.org/klasifikacija-radioaktivnog-otpada/>

[Pokušaj pristupa 05. 06. 2016.].

Hrvatska enciklopedija, 2016.. *Hrvatska enciklopedija*. [Mrežno]

Available at: <http://www.enciklopedija.hr/>

[Pokušaj pristupa 05. 06. 2016.].

Hudson, J., 1989.. *Rock Mechanics Principles in Engineering Practice*. s.l.:an.

ISRM, 1978.. *Suggested Methods for. Int. Jour. of Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*. Izdanje 15 ur. s.l.:an.



- Koeberg Alert Alliance, 2016.. *Koeberg Alert Alliance*. [Mrežno]  
Available at: <https://koebergalert.org/nuclear-waste/>  
[Pokušaj pristupa 05. 06. 2016.].
- Kvasnička, P. & Domitrović, D., 2007.. *MEHANIKA TLA Interna skripta*. Zagreb: RGNf.
- Levanat, I., 2000.. *Radioaktivni otpad*. Zagreb: Agencija za posebni otpad.
- Morén, L., 2010. *Design and production of the KBS-3 repository*, Stockholm: SKB.
- Narodne novine, 143/98, 1998.. *Zakon o odgovornosti za nuklearnu štetu*. Zagreb: Narodne novine.
- Plećaš, I. & Pavlović, R., 2003.. KONAČNO ODLAGANJE RAO MATERIJALA U SVETU I SITUACIJA U NAŠOJ ZEMLJI. *Zbornik radova XLVII Konf za ETRAN*, pp. 87-90.
- Pusch, R., 2008.. *Geological storage of radioactive waste*. s.l.:an.
- Tomić, M., 2015.. *USPOREDBA POTENCIJALNE LOKACIJE ODLAGALIŠTA NISKO I SREDNJE RADIOAKTIVNOG OTPADA U REPUBLICI HRVATSKOJ I LOKACIJE ODLAGALIŠTA U NJEMAČKOJ*. Zagreb: RGNf.
- Vulin, D., 2012.. *Petrofizika ležišta ugljikovodika*. Zagreb: RGNf.
- Zornjak, D., 2009.. *POROZNOST I PROPUSNOST LEŽIŠNIH STIJENA U SAVSKOJ I DRAVSKOJ DEPRESIJI*. Zagreb: RGNf.