

Miskolci Egyetem
Műszaki Földtudományi Kar
Geofizikai Intézeti Tanszék

Kőzetek összenyomhatóságának vizsgálata laboratóriumi háromtengelyű kísérletben

Tudományos Diákköri Dolgozat

Készítette: Kiss Anett
MSc Földtudományi mérnök szak
I. évfolyam
Konzulens: Prof. Dr. Dobróka Mihály
Intézetigazgató egyetemi tanár
Geofizikai Intézeti Tanszék

Miskolc, 2011. november 4.

EREDETISÉGI NYILATKOZAT

"Alulírott Kiss Anett, a Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Karának hallgatója büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és aláírásommal igazolom, hogy ezt a dolgozatot saját magam készítettem, a benne leírt vizsgálatokat – ha ezt külön nem jelzem – magam végeztem el, és az ismertetett eredményeket magam értem el. Adatokat, információkat csak az irodalomjegyzékben felsorolt forrásokból használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem."

Miskolc, 2011. november 4.

.....

a hallgató aláírása

KONZULENSI NYILATKOZAT

"Alulírott Prof. Dr. Dobróka Mihály, a Miskolci Egyetem Geofizikai Intézeti Tanszékének tanszékvezető egyetemi tanára a TDK dolgozatot beadásra alkalmasnak ítélem."

Egyéb megjegyzések, ajánlás:

Miskolc, 2011. november 4.

.....

a konzulens aláírása

TARTALOMJEGYZÉK

1.	BEVEZETÉS.....	1
2.	KÖZETEK KOMPRESSZIBILITÁSA	2
3.	KOMPRESSZIBILITÁS MEGHATÁROZÁSÁNAK MÓDJAI	5
3.1.	Laboratóriumi kísérletek	5
3.1.1.	Hidrosztatikus kompakció.....	6
3.1.2.	Egytengelyű feszültségváltozás axiális alakváltozással	8
3.1.3.	Egytengelyű feszültségváltozás axiális és radiális alakváltozással	10
3.1.4.	Háromtengelyű feszültségváltozás axiális alakváltozással.....	10
3.1.5.	Pórusnyomás csökkentése megakadályozott radiális alakváltozással	10
4.	ALKALMAZOTT MÓDSZER.....	11
4.1.	A mintatestek	11
4.1.1.	Permeabilitás mérése	12
4.1.2.	Porozitás meghatározása és vízzel való telítés	13
4.2.	Kísérlethez használt eszközök.....	14
4.3.	Kísérlet koncepciója és menete.....	15
4.3.1.	A koncepció.....	15
4.3.2.	Mintatest beépítése	15
4.3.3.	Kezdeti feszültségek felépítése	16
4.3.4.	Pórusnyomás csökkentése	17
4.4.	Kiértékelés.....	18
4.4.1.	„Effektív keresztmetszet” nélkül.....	18
4.4.2.	„Effektív keresztmetszettel”	18
5.	EREDMÉNYEK.....	20

6. ÖSSZEFOGLALÁS.....	25
7. IRODALOMJEGYZÉK.....	26
8. ÁBRAJEGYZÉK	28

1. BEVEZETÉS

Számos esetben megfigyelték, hogy fluidumbányászati tevékenységek közelében felszínsüllyedés következett be. Legtöbbször említik példaként a Valhall és Ekofisk offshore mezők példáját az Északi-tengeren, Norvégia partjaitól körülbelül 300 km-re. Mindkettőre jellemző, hogy a felszínsüllyedés már elérte az 5-8 métert. A valhalli terület évente körülbelül 25 centimétert süllyed (Barved et al., 2003). A kompakció oka itt kettős eredetű. Egyrészt szerepet játszik a termelés hatására kialakuló feszültségváltozás, mely a pórusnyomás csökkenését és ezáltal az effektív feszültségek növekedését jelenti. Másrészt azonban a nagyobb mértékű süllyedésért a nagy kezdeti porozitású tárolóközet a felelős. Amikor a kitermelt olaj helyére tengervízet sajtoltak vissza, a magas nyomás hatására a mészkő intergranuláris alkotókat oldott ki, majd egy sokkal kompaktabb, alacsonyabb porozitású konfigurációval rakódott le újra (Smith et al, 2002; Wikipedia [1]). Ezzel szemben a kaliforniai Long Beach környéki Wilmington mező esetében homokkő a tárolóközet, mégis 10 méteres felszínsüllyedést figyeltek meg 1960-ban. A folyamatot víz beinjektálásával stabilizálták (Geertsma, 1973).

A fent említett példákban több tényező együttes hatása váltotta ki a tengerfenék süllyedését. Ezen folyamatok által okozott károk a fúrásnál nem csak technikai problémát, hanem gazdasági veszteséget is okozhatnak. A tároló belsejében az összeköttetésben lévő pórusok összeszűküléséhez vezethetnek. Ugyanakkor a kompakció pozitív hatása, hogy megnöveli a pórusnyomást és így segíti a termelést. Ebből is látszik, hogy a tárolók kiértékelési modelljének fontos elemét képezi a kőzetek kompresszibilitásának vizsgálata.

Ezen dolgozatban a termelés okozta feszültségviszonyok megváltozásának hatására kialakuló változások vizsgálatának lehetséges módjait szeretném bemutatni. Áttekintést adok a laboratóriumokban általában végzett kísérletek menetéről, azok előnyeiről, illetve hátrányairól. Ezután bemutatom az általam is elvégzett kísérlet elvét, menetét, és a kiértékelések után kapott eredményeket, melyek jól korrelálnak az irodalmi adatokkal.

2. KÖZETEK KOMPRESSZIBILITÁSA

Egy porozitás nélküli homogén, elasztikus anyag összenyomhatóságát általánosan a következő képlet fejezi ki:

$$C = -\frac{1}{V^i} \cdot \frac{dV}{dP}$$

ahol C - anyag összenyomhatósága (jelölésére gyakran használatos még a β vagy κ)
 V - a test térfogata
 P - a külső felületre ható hidrosztatikus erő
 i - kiindulási, feszültségmentes érték.

Ebben az esetben a hőmérsékletet konstansnak feltételezzük. Megállapodás szerint a közetmechanikában a külső nyomást pozitívnak tekintjük, ha kompresszióról van szó, negatívnak, ha extenzió történik. A kompressziós nyomás hatására csökken a térfogat, így a képletben alkalmazott negatív előjellel az összenyomhatóságra pozitív értéket kapunk. Ez megkönnyíti a számolást, hiszen a vizsgált probléma során többnyire ilyen állapottal találkozunk.

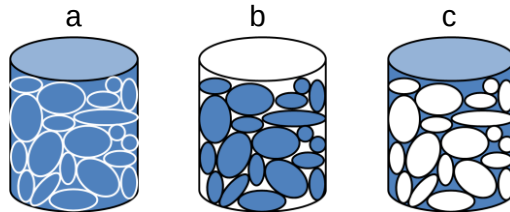
A következő térfogati alakváltozás (ε) a $d\varepsilon = \frac{dV}{V^i} = -C \cdot dP$ képlettel írható fel.

Porózus anyagok esetén, mint amilyenek a kőzetek is, a helyzet ettől bonyolultabb. A kőzetet felépítő szilárd anyagok között pórusok találhatók, melyeket fluidum (víz, olaj, gáz) tölt ki. Egy kőzet teljes porozitása megmutatja, hogy egységnyi térfogatban mennyi a pórusok térfogata. A kitöltő fluidumok egy része mobilis, másik része viszont a szemcsék között fellépő felületi erők miatt odatapad a szemcsék falához. Ez alapján effektív porozitásnak nevezzük a mobilis fluidumokat tartalmazó pórusteret. Időbeli kialakulás szerint megkülönböztetünk szingenetikus elsődleges porozitást és epigenetikus másodlagos porozitást. Az összenyomhatósági vizsgálatok szempontjából az effektív porozitás a mérvadó.

A fentiekből következik, hogy egy porózus kőzet esetében már nem csak a külső felületére ható palástnyomás lép fel, hanem jelen van egy belső pórusnyomás is. Mindemellett két különböző térfogattal kell számolni: a szilárd kőzetváz térfogatából adódó mátrixtérfogattal (V_m – matrix volume) és a pórusok térfogatával (V_p – pore volume). A kőzettérfogat (V_b – bulk volume) megadja azt a teljes térfogatot, melyet attól függetlenül mérnénk, hogy a test belsejében lévő pórusokat figyelmen kívül hagyjuk-e

vagy sem (lásd 1. ábra, ahol az adott térfogattípusokat kék szín jelöli). Porózus anyagokra elmondható, hogy

$$V_b = V_m + V_p.$$



1. ábra: (a) Kőzet-, (b) mátrix-, (c) pórustérfogat

Zimmerman (1991) négy különböző összenyomhatóságot különített el a két nyomás (palást- és pórusnyomás) és a két térfogat (kőzet- és pórustérfogat) alapján, melyek a következők:

$$C_{bc} = -\frac{1}{V_b^i} \left(\frac{\partial V_b}{\partial P_c} \right)_{P_p}$$

$$C_{bp} = \frac{1}{V_b^i} \left(\frac{\partial V_b}{\partial P_p} \right)_{P_c}$$

$$C_{pc} = -\frac{1}{V_p^i} \left(\frac{\partial V_p}{\partial P_c} \right)_{P_p}$$

$$C_{pp} = \frac{1}{V_p^i} \left(\frac{\partial V_p}{\partial P_p} \right)_{P_c}$$

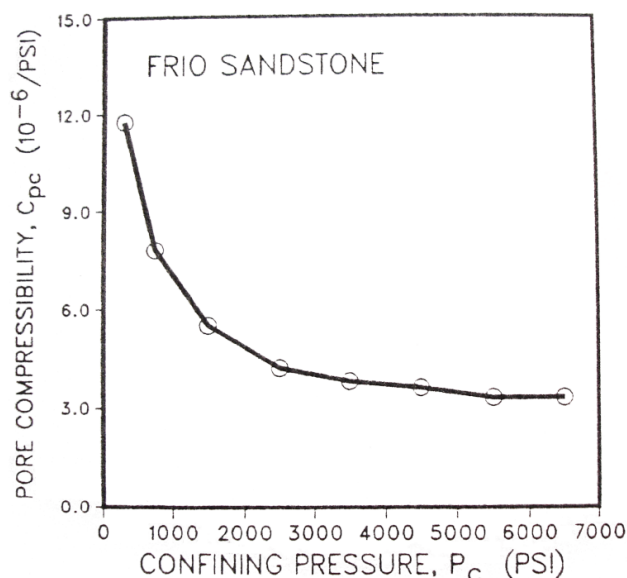
Ahol - a C kompresszibilitások indexének első tagja a releváns térfogatváltozást jelöli, a második tag a változó nyomást:

b = bulk – kőzet; c = confining – palást; p = pore – pórus

- V_b – bulk volume - kőzettérfogat
- V_p – pore volume - pórustérfogat
- P_c – confining pressure – palástnyomás
- P_p – pore pressure – pórusnyomás
- i – kezdeti, feszültségmentes állapot.

Ezekben az összefüggésekben a pórus- és palástnyomás matematikailag független változók. Ez megfelel az ún. „drénelt kompresszió”-nak, ahol a palástnyomás változása nem okoz pórusnyomás-változást. Ez nem minden terhelési körülményre igaz, azonban a fenti képletek hasznosak a „nem drénelt” állapotokra vonatkozó összefüggések levezetéséhez. Ha növeljük a palástnyomást, a kőzet és a pórusok térfogata (V_b és V_p) csökken. Növekvő pórusnyomás hatására a szemcsék távolabb kerülnek egymástól, így V_b és V_p térfogatok nőnek.

Porózus anyagok összenyomhatósága több tényezőtől is függ: kőzet típusa, cementáció foka, porozitás, betemetődés mélysége, feszültségi állapotok, hőmérséklet. Homokkővek esetében a növekvő feszültséggel csökken az összenyomhatóság, majd 40-80 MPa palástnyomásnál konstanssá válik. A 2. ábra szemlélteti egy 1664 m mélységből származó, 30% porozitású, 0 MPa pórusnyomású minta összenyomhatóságának a palástnyomástól való függését (Zimmerman, 1991).



2. ábra: A palástnyomás és a pórustér összenyomhatósága közötti kapcsolat (Zimmerman, 1991)

A kompresszibilitás fogalmát legtöbbször olyan helyzetekben használják, ahol a deformáció rugalmas, azaz a bekövetkező alakváltozás reverzibilis. Elasztikus deformáció esetén az alakváltozás egy adott időpillanatban fennálló feszültségviszonyoktól függ, a korábbi feszültségviszonyok nem befolyásolják. Amennyiben a feszültségeket teljesen megszüntetjük, a kőzet felveszi a kiindulási alakját. Konszolidált homokkővek rugalmasan viselkednek, amíg a rétegterheléses nyomás meg nem halad egy bizonyos kritikus feszültséget, mely után már visszafordíthatatlan plasztikus deformáció következik be. Szén-hidrogéntárolókban a legtöbb fluidumtermelés okozta deformáció elasztikus. (Zimmerman, 1991)

Az összenyomhatósághoz kapcsolódik a K kompresszibilitási modulus, ami megadja a hidrosztatikus nyomásváltozás (ΔP) és a végbemenő térfogati deformáció ($\Delta V/V_0$ = relatív térfogatváltozás) arányát, azaz megegyezik a kompresszibilitás (C) reciprokával (Tiab & Donaldson, 2004):

$$K = \frac{\Delta P}{\Delta V/V_0} = \frac{1}{C}$$

3. KOMPRESSZIBILITÁS MEGHATÁROZÁSÁNAK MÓDJAI

Egy tároló kompakciójának megfigyelésére in situ mérésekkel is lehetőség van. Megfelelő mértékű süllyedésnél szeizmikus módszerrel is követhetőek (Barkved et al. 2003), vagy direkt lyukgeofizikai módszerekkel is kimutathatók. Az ismétlődő mérések, mint például a 4D szeizmika nagy költségeket jelentenek. Ezzel szemben a magmintákon laboratóriumban végzett kísérletek költséghatékonyan, jó pontossággal adják meg az ismert nyomásviszonyok között bekövetkező kompakció értékét.

3.1. Laboratóriumi kísérletek

A laboratóriumi kísérletek az uralkodó feszültség-alakváltozás viszonyok alapján csoportosíthatók. Öt kategória különíthető el, melyekről az 1. táblázat és a 3. ábra ad vázlatos áttekintést. A „változó” megjelölés jelenti, hogy ezt a paramétert változtatjuk/szabályozzuk a mérés során, a „konst.”-tal jelöltek konstans értéket vesznek fel. A P_p =konstans gyakran zérus pórusnyomást jelent. A „szabad” jelentése, hogy ez a paraméter a többi hatására szabadon változik.

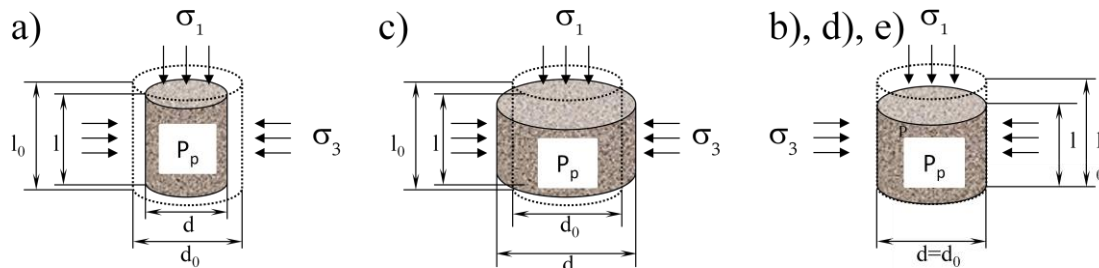
1. táblázat: Laboratóriumi kísérletek főbb jellemzői (Kiss, Baumgartner és Jahns, 2011 alapján)

	Név	σ_1	σ_3	ε_1	ε_3	P_p	Mért mennyiség
a	Hidrosztatikus kompakció	$= \sigma_3$ > 0 változó	$= \sigma_1$ > 0 változó	$\varepsilon_1 \neq 0$ szabad	$\varepsilon_3 \neq 0$ szabad	konst.	ΔV_p
b	Egytengelyű feszültségváltozás axiális alakváltozással	> 0 változó	$\neq \sigma_1$ > 0 szabad	$\varepsilon_1 \neq 0$ szabad	$\varepsilon_3 = 0$ konst.	konst.	Δl
c	Egytengelyű feszültségváltozás axiális és radiális alakváltozással	> 0 változó	$\neq \sigma_1$ konst.	$\varepsilon_1 \neq 0$ szabad	$\varepsilon_3 \neq 0$ szabad	konst.	ΔV_p
d	Háromtengelyű feszültségváltozás axiális alakváltozással	> 0 változó	$f(\varepsilon_3)$ változó	$\varepsilon_1 \neq 0$ szabad	$\varepsilon_3 = 0$ konst.	konst.	ΔV_p
e	Pórusnyomás csökkentése megakadályozott radiális alakváltozás mellett	konst.	$f(\varepsilon_3)$ változó	$\varepsilon_1 \neq 0$ szabad	$\varepsilon_3 = 0$ konst.	változó	ΔV_p vagy Δl

A táblázatban szereplő paraméterek:

- σ_1 : a hengeres mintatest forgástengelyével párhuzamos axiális feszültség
- σ_3 : ($=\sigma_2$) a hengeres mintatest palástjára merőleges feszültség, palástfeszültség

- ε_1 : a σ_1 irányával megegyező alakváltozás, továbbiakban axiális alakváltozás
- ε_3 : a σ_3 irányával megegyező alakváltozás, továbbiakban radiális alakváltozás
- P_p : pórusnyomás
- ΔV_p : pórustérfogat megváltozása
- Δl : mintatest hosszának megváltozása



3. ábra: Alakváltozások a labormérések során az 1. táblázat alapján
(Kiss, Baumgartner és Jahns, 2011 alapján)

Egy rezervoár termelése során a pórusfolyadék nyomása lecsökken, az effektív vertikális feszültség – a felső rétegek és a pórusfolyadék nyomásából származó feszültségek különbsége – megnő, és a tárolóközet így képes kompaktálódni. A laboratóriumi kísérletekkel lehetőség van ezen összenyomódás mértékének meghatározására.

3.1.1. Hidrosztatikus kompakció

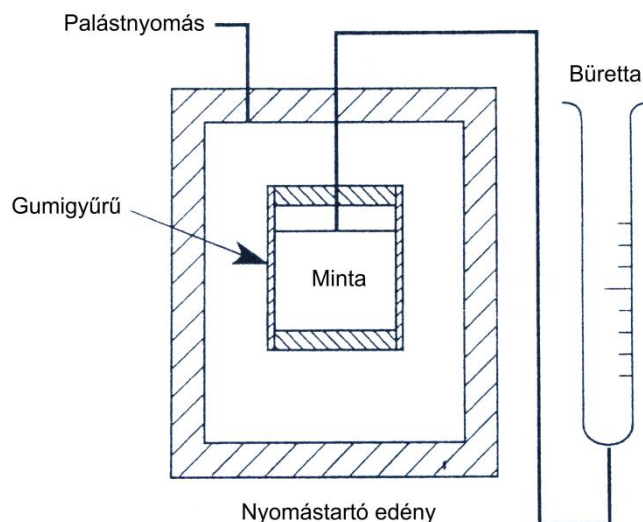
A legelterjedtebb mérési eljárás a hidrosztatikus feszültségviszonyok között végzett kompresszibilitási vizsgálat. Ennek oka az egyszerű és gyors kivitelezhetőség. A mérőeszközt a 4. ábra szemlélteti. Négy fő részből áll: hengeres mintatest, nyomástartó edény, palást- és pórusnyomást biztosító rendszer (jelen esetben atmoszférikus nyomással tart egyensúlyt).

A vizsgálat előtt a mintatestet megfelelő méretűre vágjuk és 24 órán át szárítjuk 66°C-on egy vákuumkemencében, majd sós vízzel telítjük. A pórustérfogatot a száraz és telített mintatest tömegéből számíthatjuk.

$$m_{nedves} - m_{száraz} = m_{pórusfolyadék}$$

$$V_p = \frac{m_{pórusfolyadék}}{\rho_{pórusfolyadék}}$$

ahol m a tömeg, ρ a sűrűség és V_p a pórustérfogat. A köztérfogat a mintatest átmérőjéből és magasságából számolható.



4. ábra: Hidrosztatikus mérőberendezés sematikus vázlata Zimmerman (1991) alapján

Zimmerman a kísérletéhez $l=d=5,08$ cm-es hengert használt. Fontos, hogy a henger alap- és fedőlapja egymással párhuzamos legyen. Szigetelésként a minta palástját bevonjuk egy gumigyűrűvel, mégpedig úgy, hogy a fólia rányúljon a lezáró lapokra is. Így biztosítva, hogy a palástnyomást kifejtő közeg nem jut be a pórustérbe. A lezáró lapok furattal rendelkeznek, melyeken keresztül a kiperéselt pórusfolyadék egy bürettába távozhat. A pórusnyomás az atmoszférikus nyomással tart egyensúlyt. Folyadékkal töltjük fel a nyomástartó edényt. Fontos, hogy olyan közeget válasszunk, ami nem okoz korróziót és zárlatot az edényen belül. Hidrosztatikus terhelés éri a mintatestet, azaz a tengely- és oldalirányú feszültségek megegyeznek és nem zérusok. ($\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3\neq 0$). A külső nyomások növelésekor a mintatest kompaktálódik, axiális és radiális irányban is alakváltozás következik be (lásd 3. ábra a)). Az összeszűkülő pórustérből kiszoruló folyadék mennyisége a bürettában mérhető. Korábban már említettem, hogy a közetváz kompresszibilitását sokszor elhanyagolható mértékűnek tekintik (Zimmerman, 1991; Tiab & Donaldson, 2004), így a kiperéselt folyadék térfogata megegyezik a pórustérfogat megváltozásával. A kompresszibilitás a 2. fejezetben említett módon számolható:

$$C_{pc\ hidr} = -\frac{1}{V_p^i} \left(\frac{\partial V_p}{\partial P_c} \right)_{P_p}$$

Egy rezervoárban a vizsgálandó közettest körül nem hidrosztatikus állapot uralkodik, így a kísérlet nem modellezi megfelelően a tárolóban érvényes körülményeket. Azonban a mért hidrosztatikus kompaktáció értéke a következő képlet felhasználásával átszámítható egytengelyű összenyomhatóságra (Teeuw, 1971):

$$C_{uni} = \frac{1}{3} \left(\frac{1+\nu}{1-\nu} \right) C_{pc\ hidr}$$

ahol C_{uni} - egytengelyű kompresszió

ν - Poisson hányados

$C_{pc\ hydr}$ - hidrosztatikus méréssel meghatározott kompakció.

Teeuw (1971) kísérletei alapján arra jutott, hogy egy átlagos $\nu=0,3$ Poisson hányadost használva a két kompakció közötti átszámítás hibája $\pm 10\%$.

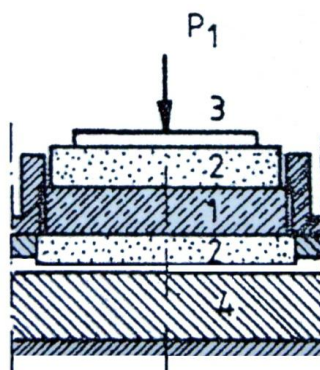
A C_{pp} meghatározásakor, vagyis abban az esetben, ha a palástnyomást tekintjük konstansnak és a pórusnyomást változtatjuk, nem szabad figyelmen kívül hagynunk, hogy a pórusnyomás megváltozásával a mintában lévő folyadéktérfogat is módosul. Például, ha növeljük a P_p -t, akkor a térfogatváltozás részben a mag pórusterébe injektált folyadékmennyiséget fogja mutatni, másrészt megjelenik a pórusfolyadék térfogatában bekövetkező csökkenés a folyadék kompressziójának hatására. Ezen kívül figyelembe kell venni az egész mérőrendszer kompresszibilitását is. Utóbbit legegyszerűbben mintatest nélküli „kalibrálóméréssel” tehetjük meg. (Zimmerman, 1991)

A közetkompresszibilitások (C_{bc} , C_{bp}) meghatározásához szükséges tudni a mintatest aktuális térfogatát, ezért hossz- és keresztirányban is fel kell rá szerelni alakváltozást mérő szenzorokat.

3.1.2. Egytengelyű feszültségváltozás axiális alakváltozással

Ez a típusú mérés az ödométeres vizsgálat. A vízzel telített mintatestet egy merev oldalfalú hengeres edénybe helyezik be úgy, hogy a minta és az oldalfal szorosan érintkezzen (5. ábra). A mintatest alatt és felett permeábilis rétegeket kell elhelyezni, melyek leggyakoribb vastagsága 10-40 mm. Erre jön a nyomólap, mely a szűrőköveken keresztül adja át a terhelést. Az edény merev fala nem engedi a laterális alakváltozást, így az axiális feszültségváltozás hatására csak axiális deformáció következik be (lásd 3. ábra b)). Az edény oldalfalán a feszültség nem zérus, értéke függ a σ_1 feszültségtől, de nem mérhető.

$$\sigma_2 = \sigma_3 = f(\sigma_1) > 0$$



5. ábra: Ödométer (Somosvári, 1987)

1-mintatest, 2-szűrőkövek, 3-nyomólap, 4-talplemez

A szűrőköveken keresztül a pórusfolyadék el tud távozni, így nem alakul ki pórusnyomás. A terhelés növelése lépcsőzetesen történik. A kiegyensúlyozási idő addig tart, amíg az összenyomódás változást mutat (Somosvári, 1987). Mérjük a függőleges terhelést és a vertikális alakváltozást. A kompresszibilitás Zimmerman képlete alapján a következőképpen számítható:

$$C_{ba} = \frac{1}{V_b^i} \left(\frac{\partial V_b}{\partial P_a} \right)_{P_p}$$

ahol C_{ba} - közetkompresszibilitás axiális terhelés változtatásakor

V_b - közettérfogat

P_a - axiális terhelés

P_p - konstans pórusnyomás mellett, jelen esetben $P_p=0$

i - kiindulási, feszültségmentes érték.

A módszer előnye, hogy nem igényel különösebb technikai apparátust és jól modellezi, hogy a közetrétegekben az oldalirányú elmozdulás a szomszédos közetek által akadályozott. Hátránya, hogy érzékeny a mintatest alakjára. Fontos, hogy a minta alsó és felső felülete egyenletes és a hengerfelületre merőleges legyen. Mindenféle eltérés túl nagy kompaktiót fog eredményezni a mérés alacsony nyomású szakaszában. A másik befolyásoló tényező a minta oldalfala. Ha nem illeszkedik precízen az edény falához, a kívánt zérus oldalirányú megnyúlás nem teljesül. Agyagokra és gyengén kötött homokokra ez a módszer megbízhatóan működik. Konszolidált közetek esetében azonban nehéz elkerülni a réseket. Porlós közeteknél a szemcsék cementáltsága is tönkremehet, mely a közet szétesésében jelentkezik és az így kapott eredmények a formációkompakcióra nem tekinthetők megbízhatónak. (Teeuw, 1971)

3.1.3. Egytengelyű feszültségváltozás axiális és radiális alakváltozással

A mérés során végbemenő feszültség-alakváltozás viszonyokat a 3. ábra c) pontja szemlélteti. A hengeres mintatest véglapjait simára és egymással párhuzamosra, a palástfelületre merőlegesre csiszoljuk. Kemencében tömegállandóságig szárítjuk, majd vízzel telítjük. A mintatestet gumicsőbe húzva két, furatokkal ellátott nyomólap közé helyezzük a nyomástartó cellába. Felszereljük a laterális és vertikális alakváltozást mérő eszközöket. A hidrosztatikus méréssel ellentétben itt az axiális és oldalirányú feszültségek különböző nagyságúak. A palástnyomást egy konstans értéken tartjuk, miközben az axiális terhelést változtatjuk. Az alakváltozás ennél a méréstípusnál minden irányba engedélyezett. A pórusnyomás konstans és mérjük az axiális feszültségváltozás hatására bekövetkező folyadéktérfogat-változást.

3.1.4. Háromtengelyű feszültségváltozás axiális alakváltozással

A mintatestet az előző mérésekben tárgyalt módon készítjük el. A hengert egy triaxiális mérőcella furattal ellátott nyomólapjai közé helyezzük úgy, hogy a ráhúzott gumicső tökéletesen illeszkedjen a mintára és rányúljon a nyomólapokra is. A cellát megtöltjük nyomásközvetítő folyadékkal. Ebben a kísérletben bár σ_1 még mindig változó, a rezervoárjellemzőket már jobban közelítjük, mert a radiális alakváltozás nem megengedett (lásd 3. ábra d)). Ennek érdekében a σ_3 palástfeszültséget úgy szabályozzuk, hogy a zérus laterális megnyúlás biztosítva legyen. A vertikális terhelést változtatva így csak tengelyirányban tud a mintatest deformálódni (New England Research [2]). A kiszorított pórusfolyadék mennyisége – feltételezve, hogy a $C_m \ll C_b$ (Teeuw, 1971; Tiab & Donaldson, 2004), azaz $C_m \ll C_p$ – megadja a pórustérfogat változását és így a kompresszibilitás az ismert képlettel számítható.

3.1.5. Pórusnyomás csökkentése megakadályozott radiális alakváltozással

Az öt mérési metódus közül ez szimulálja a legjobban a tárolókőzetből való fluidumtermelést. Hasonlít a 3.2.4 fejezetben bemutatott módszerhez, de ebben az esetben a vertikális terhelés konstans. A mintatest triaxiális cellába való beépítése és megfelelő szigetelése után beállítjuk a kívánt kiindulási feszültségviszonyokat. A vertikális feszültség konstans marad, a palástnyomást úgy szabályozzuk, hogy a radiális irányú alakváltozás zérus maradjon. A pórusnyomást fokozatosan csökkentjük – ezzel szimulálva a termelést -, amíg el nem éri a „kiürített” tárolóra jellemző pórusnyomást. A pórusvíz nyomásának csökkenésekor megnő az effektív feszültség, ennek hatására a

mintatest kompaktálódik. A kiszorított vízmennyiséget mérve számítható a pórustérfogat csökkenése, majd a kompresszibilitás.

4. ALKALMAZOTT MÓDSZER

A kísérleteket a németországi Gesteinslabor Dr. Eberhard Jahns kőzetmechanikai vizsgálatokkal foglalkozó laborban két kollégámmal együtt terveztem meg és végeztem el. A mérés lényege, hogy azt az előző fejezetekben bemutatott eljárások közül a „Háromtengelyű feszültségváltozás axiális alakváltozással” és a „Pórusnyomás csökkentése megakadályozott radiális alakváltozással” módszerek kombinációjaként hajtottuk végre. A következőkben szeretném bemutatni a mintatestekkel kapcsolatos információkat, a mérőberendezéseket, a kísérlet menetét, a kiértékelés módját, végül az eredményeket.

4.1. A mintatestek

A 15 darab hengeres mintatest három különböző fúrás magmintáiból származott. A fúrásokat a dolgozatban római számokkal (I-II-III) jelölöm, a mintatesteket minta1-minta15-ig számoztam be. Többnyire finom- illetve durvaszemcsés homokkövek. Eltérő hosszúságuk és egyenetlen véglapjaik miatt egy gyémánttal bevont leválasztó csiszológépen a lehető legnagyobbra lettek levágva. A gép lassú, automatikus előrehaladása biztosította a véglapok kiváló minőségét. A fűrészelő asztal oldalirányba manuálisan eltolható, így a lerögzített mintatest kivétele nélkül teszi lehetővé a párhuzamos vágásokat. Így utólagos csiszolás nélkül is elérhető a véglapok ASTM D 4543-07-es szabvány szerinti parallelitása. Hogy elkerüljük a mintatestek anyagában a víz hatására esetlegesen bekövetkező változásokat, a vágáskor nem használtunk vízbázisú hűtőközeget. Helyette könnyen illó, alacsony viszkozitású vágóolajat alkalmaztunk.

A mintatestek főbb jellemzőit a 2. táblázatban foglaltam össze. A III. fúrásból származó öt mintán (minta10-minta15) látható volt, hogy olajat tartalmaznak. A kompressziós kísérletek elvégzése után ezekből a mintákból Soxhlet-extrakcióval az olaj kivonásra került, hogy esetlegesen ellenőrző mérést lehessen rajtuk végezni.

2. táblázat: A mintatestek főbb paraméterei
(dőlttel szedett permeabilitás értékek extrahálás utáni mérésből származnak)

Fúrás	Minta neve	Mélység (m)	Hossz (mm)	Átmérő (mm)	Porozitás (-)	Porozitás extrahálás után (-)	Permeabilitás (mD)
I	minta1	3149,31	57,56	37,57	0,142	-	-
I	minta2	3150,30	59,69	37,58	0,218	-	1,01E+03
I	minta3	3150,85	56,99	37,67	0,267	-	1,35E+03
I	minta4	3150,94	56,89	37,69	0,254	-	-
I	minta5	3151,44	57,57	37,67	0,213	-	2,28E+03
II	minta6	2661,11	68,25	29,66	0,231	-	1,05E+03
II	minta7	2661,82	68,76	29,56	0,248	-	1,56E+03
II	minta8	2663,06	68,52	29,49	0,245	-	2,20E+03
II	minta9	2664,78	69,82	29,88	0,194	-	8,54E+02
II	minta10	2660,60	69,75	29,84	0,223	-	9,10E+02
III	minta11	2177,86	69,09	28,31	0,117	0,299	1,71E+03
III	minta12	2179,66	69,40	28,31	0,184	0,342	3,49E+03
III	minta13	2180,91	69,72	28,33	0,157	0,35	5,53E+03
III	minta14	2186,58	69,49	28,33	0,233	0,384	4,55E+03
III	minta15	2190,26	69,83	28,36	0,167	0,345	2,93E+03

4.1.1. Permeabilitás mérése

A kompresszibilitási mérés tervezéséhez szükséges volt tudni, milyen áteresztőképességgel rendelkeznek a mintáink. Alacsony permeabilitás esetén a pórusnyomás növelésekor hosszabb időre van szükség a nyomás kiegyenlítéséhez. Az atmoszférikus körülmények közötti gázpermeabilitás meghatározását az ASTM D 4525-04-es szabvány szerint végeztük el a laborban található félautomata permeaméterrel (6. ábra).

A berendezésnek a bemeneti nyomás és az áramlási sebesség szempontjából is két mérési intervalluma van. Kis nyomáskülönbségek meghatározásához egy U-csőmanométer van ráköthető. Az áramlási sebességet két termikus tömegárammérővel mérjük, melyek mérési intervalluma 10 és 100 sccm (standard cubic centimetre). A tényleges térfogatáramra (QM) való átszámítás – a mérési hőmérsékletre és közepes nyomásnívóra (P_m) vonatkoztatva – utólag történik a kiértékelési eljárás során. Az így meghatározott látszólagos permeabilitás Klinkenberg-effektusa végül Rieckmann (1970) után került korrigálásra.

A mintatestet egy pneumatikus Fancher-típusú mintatartóba építettük be és egy oldalról nitrogént nyomtunk bele. A P1 bemeneti és P2 kimeneti nyomásokat két elkülönített vezetéken keresztül, közvetlenül a mintatest felületén mértük, ezért nem volt szükség nyomáskorrekcióra. A térfogatáram egy termikus tömegárammérő segítségével és az általános gáztörvény felhasználásával került meghatározásra.



6. ábra: Permeaméter

4.1.2. Porozitás meghatározása és vízzel való telítés

A porozitás meghatározását és a vízzel való telítést is a DIN EN 1936 (1999) szabvány alapján végeztük. A mintatesteket 65°C-on tömegállandóságig szárítottuk, majd megmértük a hosszúságukat (l), átmérőjüket (d) és tömegüket ($m_{szár}$). Ezekből az értékekből kiszámítottuk a V köztérfogatokat. A mintatestekre egy vékonyfalú PTFE (Politetrafluoroetilén)-mintacsövet zsugorítottunk (a csövek tömegét megmértük).

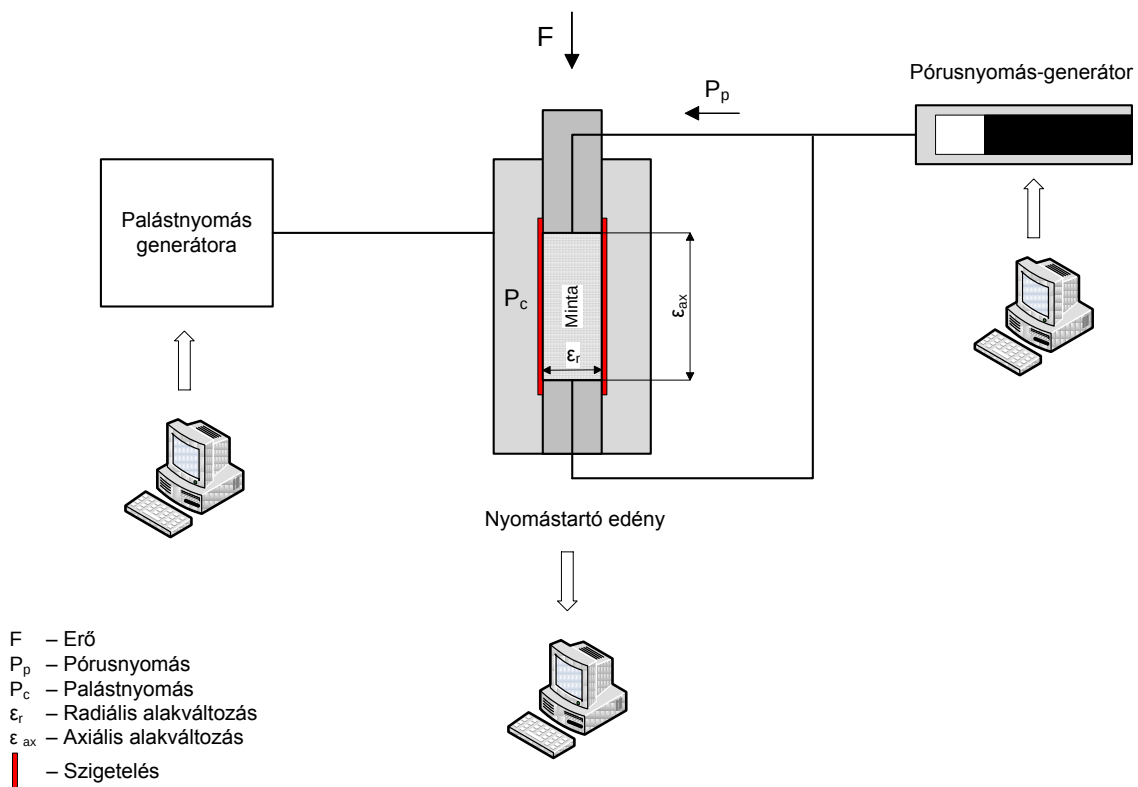
A kiszáritott mintatesteket a tömegmérés után ekszikátorban 24 órán át tartottuk, hogy eltávozzon belőle az összes gáz. Ezután desztillált vízzel árasztottuk el őket és további 24 órán át vákuum alatt, majd újabb 24 órán át atmoszférikus nyomáson tartottuk. A mintatestek külsején lévő tapadó vizet egy nedves bőrdarabbal felitattuk és megmértük a minta tömegét. Ebből levonva a zsugorcső tömegét megkaptuk a minták nedves tömegét (m_{nedves}). A nyitott vízporozitást (ϕ_0) a következő képlet alapján számítottuk:

$$\phi_0 = \frac{(m_{nedves} - m_{szár}) \cdot \rho_{víz}}{V}$$

4.2. Kísérlethez használt eszközök

A kompresszibilitási kísérletekhez használt mérőállomás öt fő részből állt: mintatest, nyomástartó triaxiális cella, palástnyomást előállító generátor, axiális terhelést biztosító terhelőkeret, pórusfolyadék rendszer. A sematikus felépítést a 7. ábra mutatja.

A méréseket egy digitálisan szabályozott, szervohidraulikus mérőberendezésen végeztük. Mindegyik mérőberendezés legalább 1% pontossággal van kalibrálva (azaz a maximális mérési hiba a mért érték 1%-a). A mintatesteket a GL Test Systems GmbH által készített triaxiális mérőcellába építettük be. Ezek a cellák a kicserélhető nyomópecséteknek köszönhetően könnyen átalakíthatók különböző átmérőjű mintatestek számára. A terhelőbéllyegek furattal vannak ellátva, hogy lehetőség legyen pórusnyomás beállítására és kontrollálására. A mintatestek véglapjainak kitűnő parallelitása miatt nem volt szükség szférikus nyomólapok alkalmazására. A tényleges axiális alakváltozást LVDT-vel (Linear Variable Differential Transformer), a radiális alakváltozást pedig a mintával két ponton érintkező megnyúlásmérővel, közvetlenül a mintatesten mértük. Minden fontos paraméter 10 másodperces időközönként automatikusan került mentésre.



7. ábra: A mérőberendezés sematikus felépítése (Kiss, Baumgartner és Jahns, 2011 alapján)

4.3. Kísérlet koncepciója és menete

4.3.1. A koncepció

Tiab & Donaldson (2004) alapján a szilárd közetváz kompresszibilitása (C_m) elhanyagolhatóan kicsi a pórustér összenyomhatóságához (C_p) képest. Eszerint a mérések során kapott pórustérfogat-változás egyben a teljes mintatest térfogatának megváltozásával egyezik meg. Ha a hengeres test alakváltozása csak axiális irányba engedélyezett, a bekövetkező pórustérfogat-változás (ΔV_p) az alábbi képlettel számítható:

$$\Delta V_p = \Delta l \cdot A$$

ahol Δl a minta hosszának megváltozása, A a minta keresztmetszete.

Ezen megállapítás helytállóságának megállapítása érdekében a mérés menetét úgy alakítottuk ki, hogy az A faktor több helyen mérhető legyen. A következőkben „effektív keresztmetszetként” (A_{eff}) elnevezett érték megadja a tényleges összefüggést a Δl és a ΔV_p között, így ΔV_p a következő képlet szerint számolható:

$$\Delta V_p = \Delta l \cdot A_{eff}$$

Az effektív keresztmetszet meghatározására húsz pórusnyomásszinten hoztunk létre hosszváltozást a mintán és konstans pórusnyomás mellett mértük a bekövetkező pórustérfogatváltozást. Ez alapján az A_{eff} számítható:

$$A_{eff} = \frac{\Delta V_p}{-\Delta l}$$

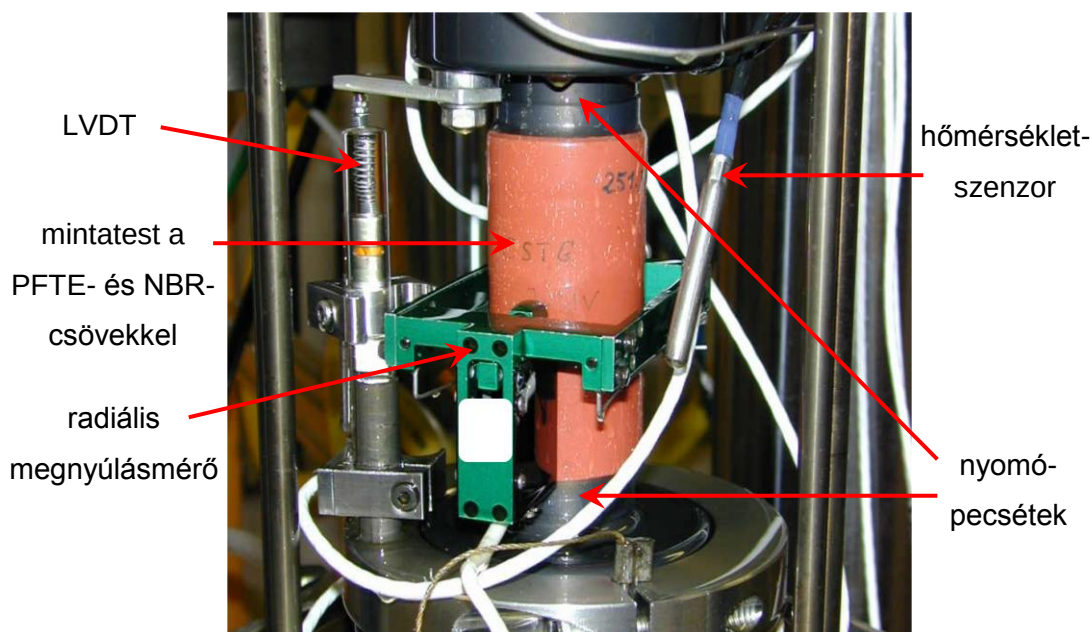
A pórustér kompresszibilitásához képest elhanyagolható mértékű mátrixkompresszibilitás (Teuuw, 1971) miatt az A_{eff} értéke közel van a tényleges keresztmetszet értékéhez.

A mérést a „Háromtengelyű feszültségváltozás axiális alakváltozással” és a „Pórusnyomás csökkentése megakadályozott radiális alakváltozással” módszerek kombinációjaként végeztük el. A pórusnyomáscsökkentő lépcsők $\Delta P_p=0$ szakaszán axiális feszültségváltoztatás hatására tengelyirányú alakváltozást idéztünk elő, mely a kiértékelés során kapott szerepet.

4.3.2. Mintatest beépítése

A mintatestet egy vékonyfalú PFTE (Politetrafluoroetilén)–zsugorcsoval és egy másik NBR (Nitrile butadiene rubber)–szigetelőcsővel választjuk el a nyomóközegetől és úgy építjük be a mérőcella nyomólapjai közé, hogy az NBR-szigetelés a pecsétetekre is rányúljon. A merev tefloncsőre két ok miatt volt szükség: néhány minta kisebb keresztmetszettel érkezett, így a különbséget a csővel korrigálni tudtuk, valamint a radiális alakváltozás korrekt mérése csak merev felületen lehetséges. Az NBR-cső biztosította a

tökéletes szigetelést a nyomópecsételnél. Az axiális és radiális megnyúlásmérők felhelyezése után az egész szerkezetet (lásd 8. ábra) beépítjük a nyomástartó edénybe. Csatlakoztatunk egy PT100 hőmérsékletérzékelőt is.



8. ábra: A mintatest beépítése a szenzorokkal a triaxiális cellába

A beépítés után a mintát egy oldalról 0,25 MPa pórusnyomással elárasztjuk desztillált vízzel, hogy a mintában és a vezetékekben esetlegesen előforduló levegőt kiszorítsuk. Egyidejűleg 0,5 MPa palástnyomást hozunk létre a mérőcellában.

4.3.3. Kezdeti feszültségek felépítése

Miután a levegőt eltávolítottuk a rendszerből, az axiális feszültséget és a palástnyomást hidrosztatikus feszültségviszonyok között a fedőrétegek nyomásáig növeljük ($P_{\text{overburden}}$). A pórusnyomást szimultán állítjuk be a kiindulási értékre ($P_{\text{p initial}}$). A rezervoáradatokat a 3. táblázatban foglaltam össze.

3.táblázat: Rezervoáradatok

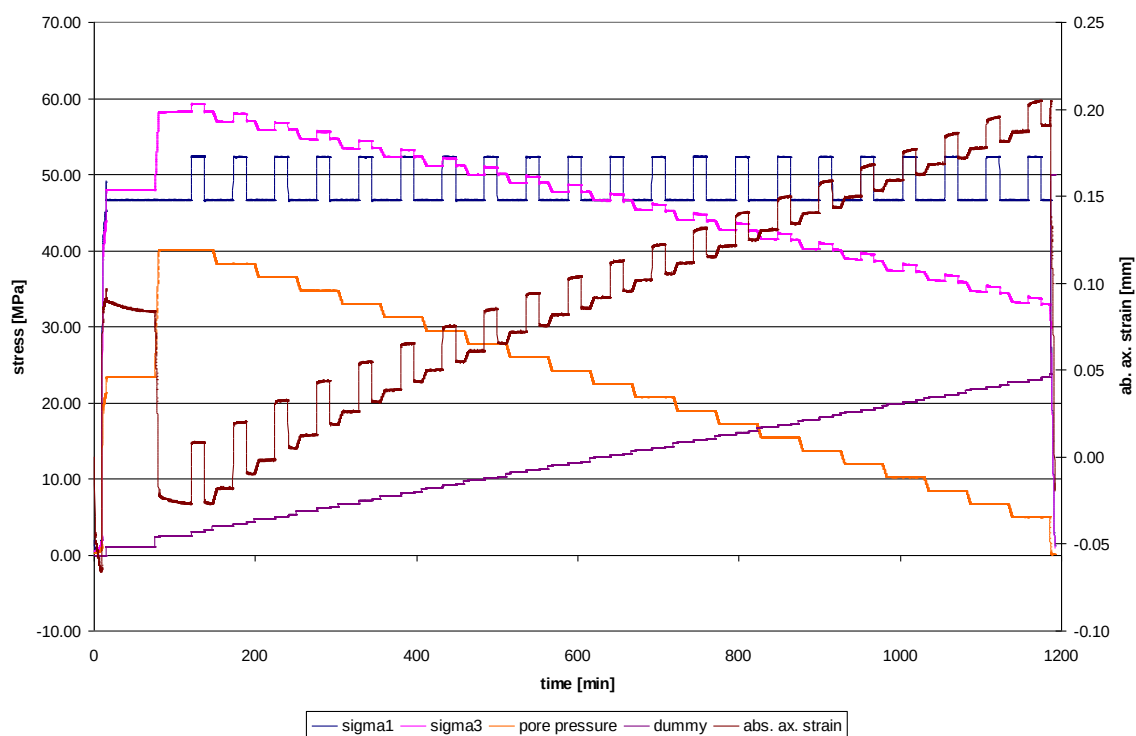
Fúrás száma	$P_{\text{overburden}}$ [MPa]	$P_{\text{p initial}}$ [MPa]	$P_{\text{p injected}}$ [MPa]	$P_{\text{p depleted}}$ [MPa]
I	62,2	30,1	43,2	6,0
II és III	48,0	23,3	40,0	5,0

Egy óra kiegyenlítődési fázis után a radiális alakváltozás értékét lerögzítjük és innentől a mérés végéig változatlanul tartjuk. Ezt a palástnyomás megfelelő szabályozásával érjük el. A pórusnyomást a beinjektálási ($P_{\text{p injected}}$) szintre növeljük, majd 40 percet várunk.

4.3.4. Pórusnyomás csökkentése

A pórusnyomást húsz lépcsőben csökkentjük le a $P_{p \text{ injected}}$ szintről a kiürült $P_{p \text{ depleted}}$ szintre. Minden lépcsőn egy rövid kiegyenlítődési fázis után az axiális feszültséget a $P_{\text{overburden}}$ érték körül pulzusszerűen változtatjuk, ezzel jelentős axiális alakváltozást idézve elő. Az utolsó pórusnyomáslépcső ($P_{p \text{ depleted}}$) elérése után minden feszültséget megszüntetünk, majd kiépítjük a mintát.

A mérés menetét a 8. ábra mutatja. Sigma1-el jelöltük az axiális feszültséget, sigma3-mal a palástnyomást. Jól elkülöníthető a narancssárgával jelzett pórusnyomásgörbén a húsz lépcső, a sigma1 görbén a $\Delta P_p = 0$ szakaszokon az axiális terheléspulzusok, valamint a következtében lejátszódó axiális alakváltozások a barna görbén.



9. ábra: A mérés menete (Kiss, Baumgartner és Jahns, 2011)

4.4. Kiértékelés

A pórustér kompressziójának pórusnyomástól való függését (C_{pp}), megakadályozott radiális alakváltozás (ε_{rad}), és konstans axiális terhelés (σ_1) mellett Zimmerman (1991) képlete alapján a következő formulával számolhatjuk:

$$C_{pp} = \frac{1}{V_p^i} \left[\frac{\Delta V_p}{\Delta P_p} \right]_{\varepsilon_{rad}; \sigma_1}$$

- ahol
- C_{pp} – a pórustér kompresszibilitása változó pórusnyomás mellett
 - ΔV_p – pórustérfogat megváltozása
 - ΔP_p – pórusnyomás megváltozása
 - i – kezdeti, feszültségmentes állapot.

A pórusnyomás megváltozását (ΔP_p) a beinjektált és kiürített állapotokhoz tartozó pórusnyomások ($P_{p \text{ injected}}$ és $P_{p \text{ depleted}}$) és a pórusnyomás-csökkentési lépcsők száma (n) alapján a következő képlettel határozzuk meg:

$$\Delta P_p = \frac{P_{p \text{ injected}} - P_{p \text{ depleted}}}{n - 1}$$

A képletben szereplő pórustérfogat-változás számítható a mintatest keresztmetszetéből és a hosszának megváltozásából:

$$\Delta V_p = A \cdot \Delta l$$

4.4.1. „Effektív keresztmetszet” nélkül

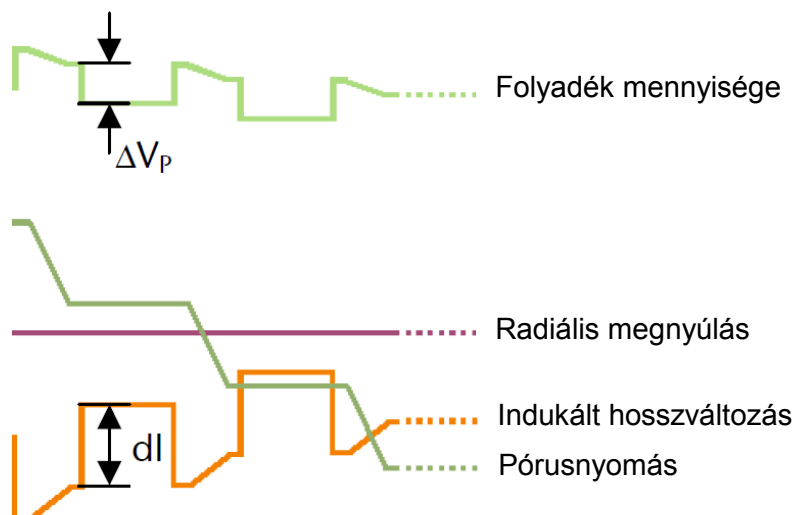
A keresztmetszet számítható a feszültségmentes állapothoz tartozó átmérőből (d_0) és a kiindulási feszültségállapothoz tartozó átmérőváltozásból (ε_{rad}):

$$A = \frac{\pi}{4} (d_0 - \varepsilon_{rad})^2$$

4.4.2. „Effektív keresztmetszettel”

Az „effektív keresztmetszet”-et az axiális terhelés pulzusszerű növelésével indukált tengelyirányú alakváltozásból (Δl) és a hozzá tartozó, a pórusnyomás generátora által regisztrált folyadékáthelyezésből számítható. A folyadék mennyiségének megváltozása megadja a pórustérfogat megváltozását (ΔV_p). A kiértékeléshez használt értékeket a 10. ábra mutatja. Az „effektív keresztmetszet” a következő képlettel adható meg:

$$A_{eff} = \frac{\Delta V_p}{-\Delta l}$$



10. ábra: Kiértékeléshez használt paraméterek (Kiss, Baumgartner és Jahns, 2011)

Az „effektív keresztmetszet” általában a kezdeti keresztmetszet értéke alá esik. Mindössze az I. fúrás két mintatestének esetében volt lényegesen nagyobb. Ennek oka valószínűleg egy nagyon kicsi szivárgás, ami egy állandóan emelkedő A_{eff} -hez vezet. Az A_{eff} értékek hullámzásának oka a nagyon kicsi axiális alakváltozások mérésének pontatlanságára vezethető vissza. A deformációk nagysága 0,0054 és 0,3610 mm közé esik (átlag 0,03 mm). A deformációs impulzus által kipréselt folyadék mennyisége is minimális, 6,5-60 mm³ között van.

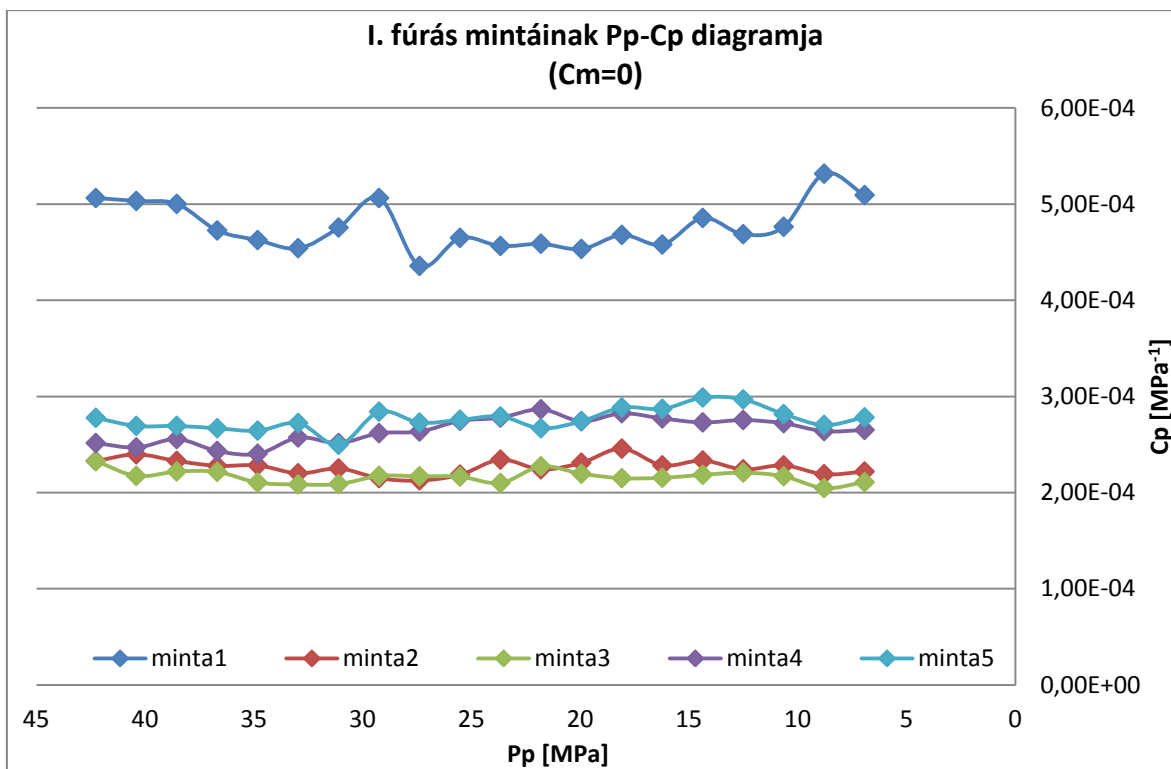
5. EREDMÉNYEK

Általánosságban elmondható, hogy a tényleges keresztmetszet értékekkel számolva a kompresszibilitások értéke valamivel magasabb, mint az effektív keresztmetszetet felhasználva. Ez azt mutatja, hogy a vizsgált mintatestek esetében ugyan a szilárd közegetváz kompressziójának is szerepe van, mégis jelentősen kisebb, mint a pórustér kompressziója.

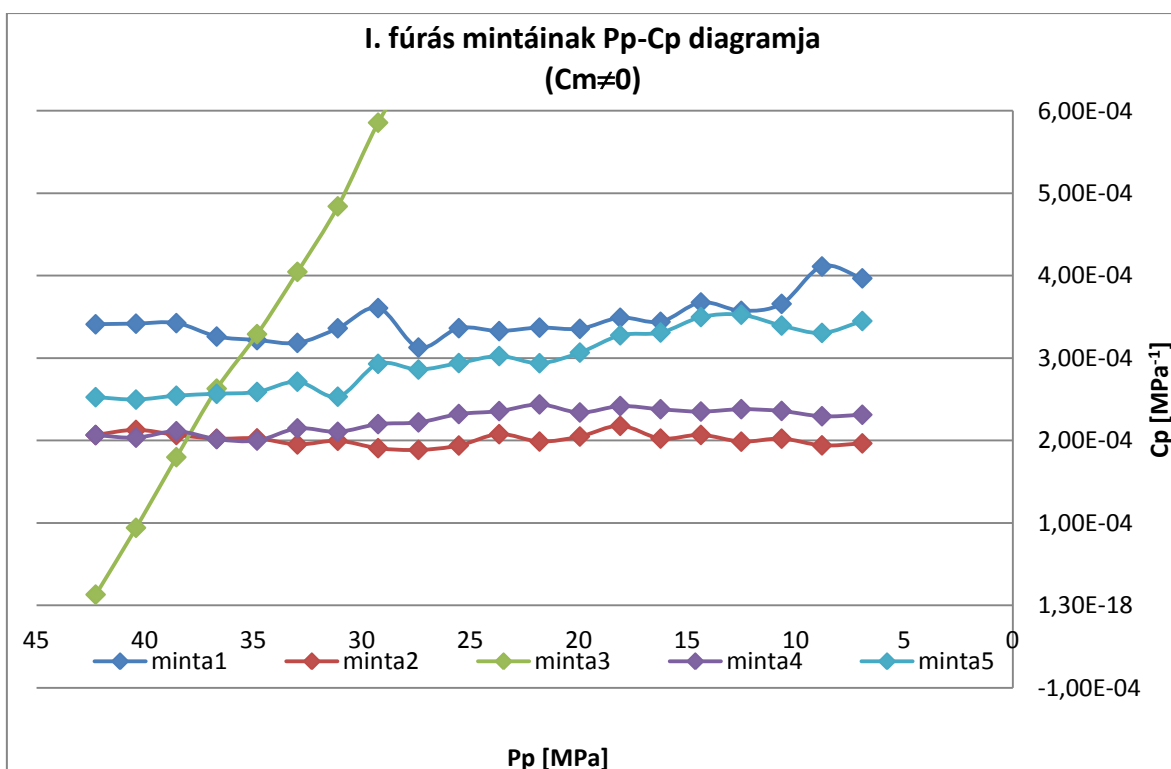
A három fúrás mintáinak kompresszibilitás-eredményeit a 11-16. ábrákban foglaltam össze. Mindegyik fúrásnál bemutatom a két kiértékeléssel kapott eredményeket. A „minta3” esetében az effektív keresztmetszettel való kiértékelés a minta szigetelésének sérülése miatt nem hozott eredményt. A 12. ábra mutatja az I. fúrás effektív keresztmetszettel kiértékelt eredményeit. A kompresszibilitás értékek $2,0 \cdot 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ és $4,0 \cdot 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ közé esnek, közel azonos nívóval. A különböző összenyomódási értékek a mintatestek anyagának inhomogenitását tükrözik. A „minta1” esetében az A_{eff} -vel való kiértékelés jelentősen lefelé korrigálta az eredményt.

A II. fúrás mintáinak eredményeit a 13. és a 14. ábra mutatja. A kiindulási keresztmetszettel és elhanyagolt mátrixkompresszibilitással ($C_m=0$) kiszámolt kompresszibilitás-értékek a pórusnyomás magasabb tartományaiban ($P_p=40\text{-}25 \text{ MPa}$) nagyobb szórást mutatnak. A $P_{\text{pdepleted}}$ nyomásnál az átlagos összenyomhatósági érték a $2,0 \cdot 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$. Az effektív keresztmetszettel való kiértékeléskor ez az érték $1,7 \cdot 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$. Általánosságban elmondható, hogy az eredmények jól tükrözik a finom- és közepes szemcsés homokkőminták homogenitását. A kompresszibilitási görbék minden minta esetében azonos lefutásúak.

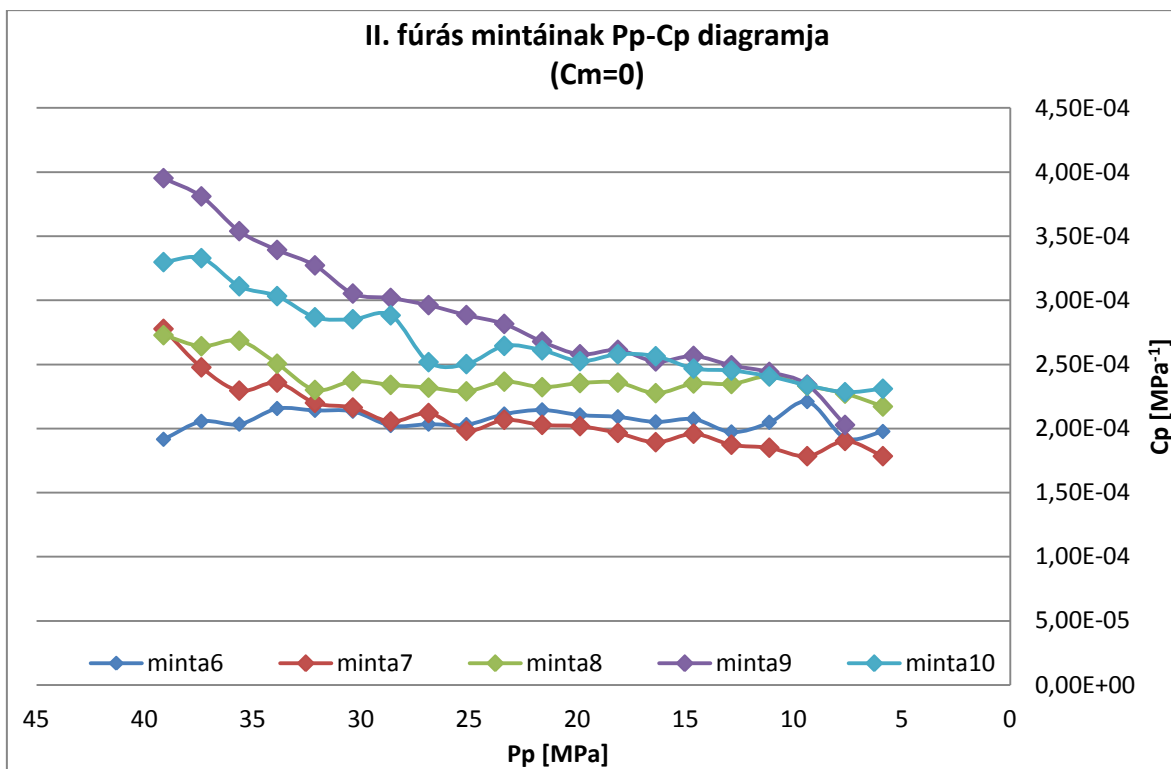
A III. fúrás mintáinak kiértékelései jelentős különbséget mutatnak. Ezek a minták mind finomszemcsések, pórusaikban olajtartalommal. Általánosságban elmondható, hogy az első kiértékelési módszerrel (eredeti keresztmetszettel számolva, $C_m=0$) az eredmények nagyobb szórást mutatnak: $2,0 \cdot 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ és $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ között. Jellemző, hogy a kezdeti csökkenés után 25 MPa pórusnyomástól ismét emelkedő trendet mutatnak a görbék. Effektív keresztmetszettel számolva az eredmények homogénebbek, azonban a növekvő kompresszibilitás a 25 MPa pórusnyomás alatt itt is megfigyelhető. Ennek oka lehet a pórusokat részlegesen kitöltő olaj eltérő reakciója a feszültségek megváltozására.



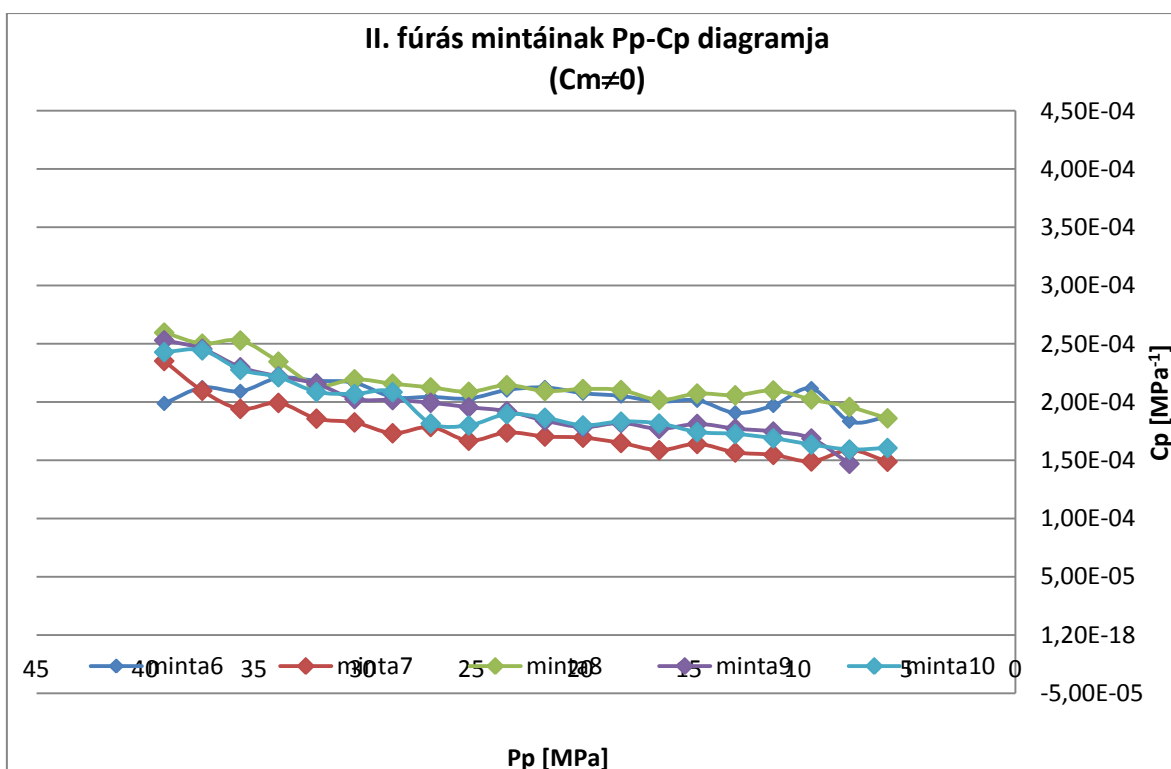
11. ábra: Az I. fúrás mintáinak kompresszibilitása (C_m=0 esetben)



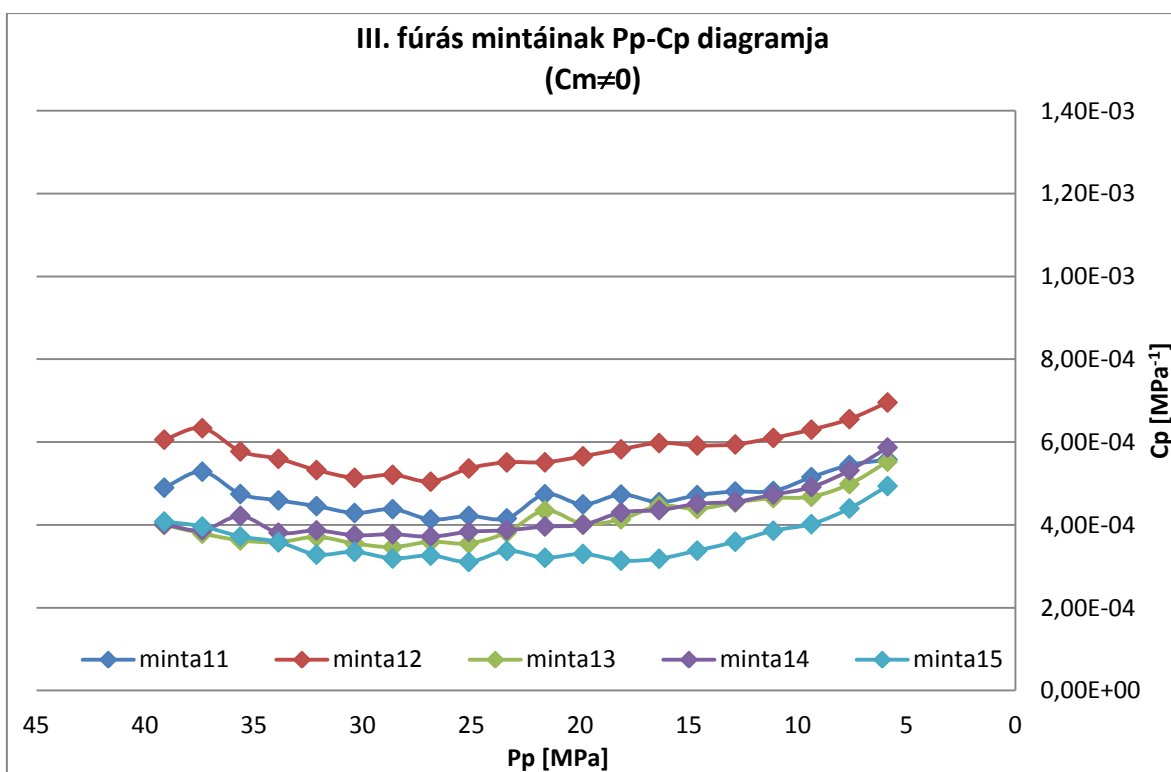
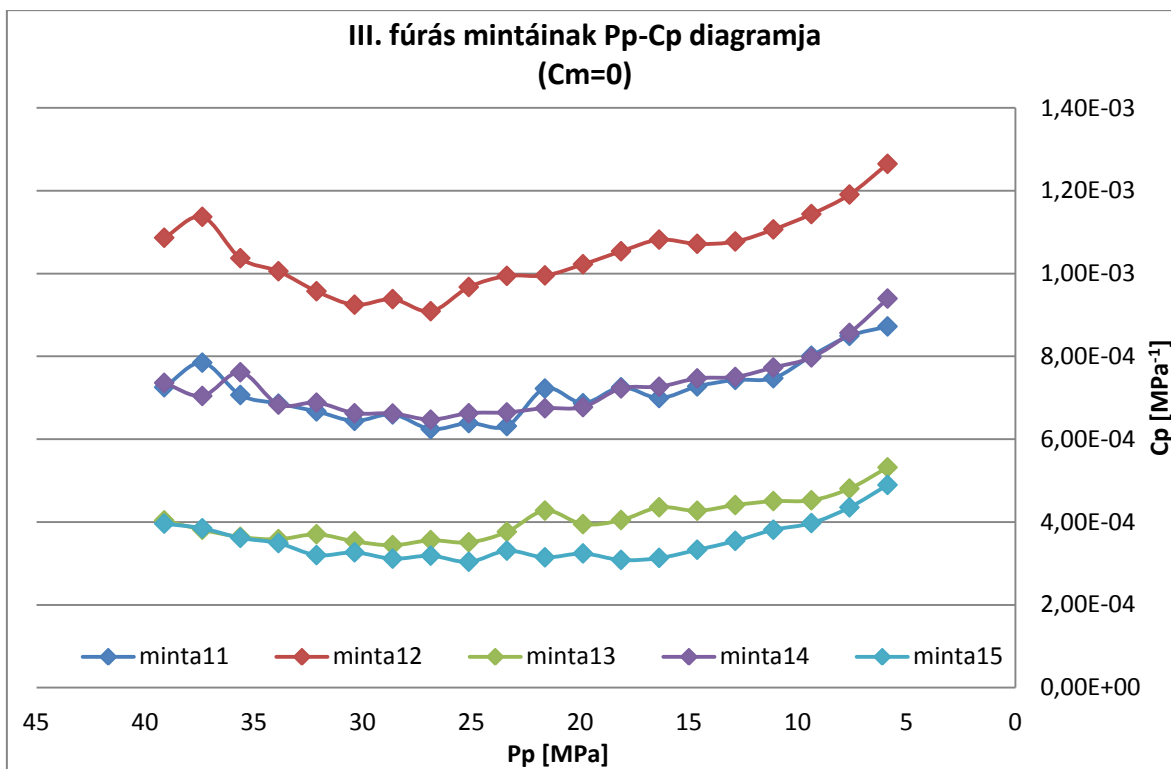
12. ábra: Az I. fúrás mintáinak kompresszibilitása A_{eff}-el számolva



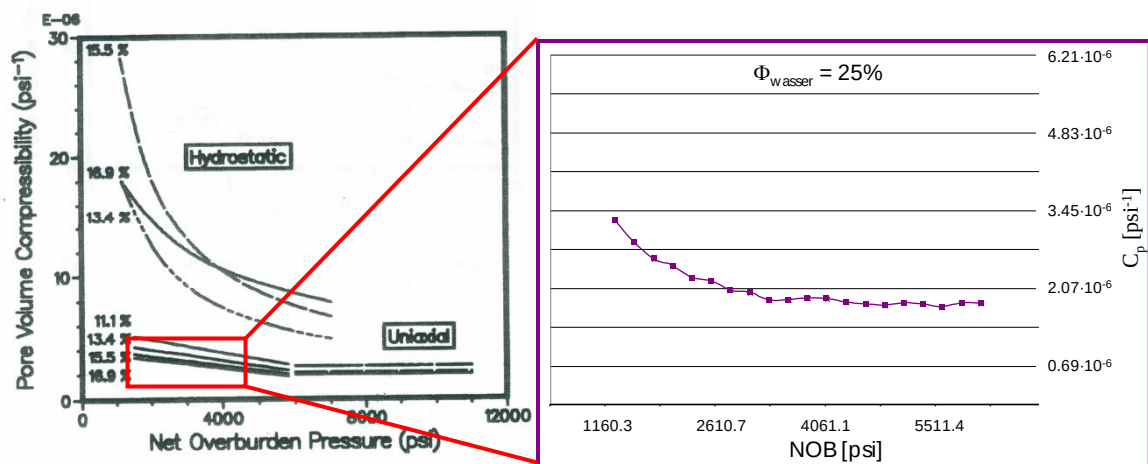
13. ábra: A II. fúrás mintáinak kompresszibilitása (C_m=0 esetben)



14. ábra: A II. fúrás mintáinak kompresszibilitása A_{eff}-el számolva



A kapott eredményeket az irodalmi adatokkal összevetve jó egyezést kaptunk. Lachance és Andersen (1983) hidrosztatikus és egytengelyű kompresszibilitási vizsgálatok összehasonlítását végezte. A 17. ábrán példaként az általuk kapott eredmények és a II. fúrásból származó „minta7” közti korrelációt mutatom be. A Lachance és Andersen által szerkesztett bal oldali diagramon pirossal jelölt keret a 25% porozitású „minta7” eredményeinek megfelelő régiót jelöli. Látható, hogy a kompresszibilitás értékek mind nagyságukban, mind lefutásukban jól illeszkednek az irodalmi adatokhoz. A dolgozatban bemutatott minták kompresszibilitása korrelál a „minta7”-en kapott eredményekkel (lásd 11-16. ábra).



17. ábra: Eredmény összehasonlítása irodalmi adatokkal (Kiss, Baumgartner és Jahns, 2011)

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A kőzetek kompresszibilitásának megismerése a tárolókiértékelési modellek egyik fontos paramétere, melynek mértéke több tényezőtől is függ: kőzetet felépítő ásványok, szemcsék cementáltsága, feszültségviszonyok, kőzet porozitása, stb. A kőzetek kompresszibilitása két komponensből, a mátrix és a pórusok összenyomhatóságából tevődik össze. Irodalmi ajánlások alapján (Teeuw, 1971) a mátrixkompresszibilitást elhanyagolhatóan kicsinek szokták tekinteni.

Dolgozatomban bemutattam öt laboratóriumi mérés elvét, melyekkel meghatározható a kőzetek összenyomhatósága:

„Hidrosztatikus kompakció”, „Egytengelyű feszültségváltozás axiális alakváltozással”, „Egytengelyű feszültségváltozás axiális és radiális alakváltozással”, „Háromtengelyű feszültségváltozás axiális alakváltozással”, „Pórusnyomás csökkentése megakadályozott radiális alakváltozás mellett”.

Az általam is alkalmazott metódus a „Háromtengelyű feszültségváltozás axiális alakváltozással” és a „Pórusnyomás csökkentése megakadályozott radiális alakváltozás mellett” kísérletek kombinációja volt. Ennek lényege, hogy a pórusnyomást húsz lépcsőben csökkentettük a $P_{p \text{ injected}}$ szintről a $P_{p \text{ depleted}}$ szintre. Az axiális terhelés a pórusnyomás lépcsők konstans szakaszának kivételével konstans volt. A $\Delta P_p =$ konstans szakaszokon σ_1 értékét pulzusszerűen megnöveltük, ezzel axiális alakváltozást idézve elő. A kísérlet során a radiális alakváltozást a palástnyomás szabályozásával zérus értéken tartottuk.

Kiértékeléskor kétféle keresztmetszetet használtam. Az első „hagyományos” esetben a kiindulási keresztmetszettel számoltam. A másik kiértékelésnél az ún. „effektív keresztmetszetet”, melyet a pulzusszerű axiális terhelésnöveléskor bekövetkező axiális alakváltozásból határoztam meg.

Az eredmények alapján elmondható, hogy az „effektív keresztmetszettel” kapott eredmények szórása kisebb, a kétféle kiértékelés közti különbség feltehetőleg a mátrixkompresszibilitásból adódik. A III. fúrás mintái a 25 MPa pórusnyomásnál alacsonyabbi tartományban növekvő kompresszibilitást mutatnak. Ennek oka feltehetőleg a pórustér olajtartalmából adódik. Az eredmények jól korrelálnak az irodalmi adatokkal.

7. IRODALOMJEGYZÉK

Könyvek, kéziratok

- SOMOSVÁRI, Zs.: Geomechanika I.; Kézirat, Tankönyvkiadó, Budapest, 1987.
- TIAB, D., DONALDSON, E.C.: Petrophysics; Elsevier, p 586-590., 2004.
- ZIMMERMAN, R.W.: Compressibility of Sandstones; Developments in Petroleum Science, 29; Elseviers Science Publishers B. V., Amsterdam., 1991.

Folyóiratban megjelent cikkek

- GEERTSMA, J.: Land Subsidence Above Compacting Oil and Gas reservoirs; Journal of Petroleum Technology, 1973. június
- KISS, A., BAUMGARTNER, H. & JAHNS, E.: Gesteinskompressibilität im Triaxial-experiment; Vorträge der 3. Fachtagung Geotechnik, Schriftenreihe Geotechnik Heft 03, Drezden, Germany, 2011.
- RIECKMANN, M.: Untersuchung von Turbulenzerscheinungen beim Fließen von Gasen durch Speichergesteine unter Berücksichtigung der Gleitströmung; Erdöl-Erdgas- Zeitschrift, 86. Jg., 36 – 51., 1970.
- TEEUW, D.: Prediction of Formation Compaction from Laboratory Compressibility Data; Society of Petroleum Engineers Journal 263-269., 1971. szeptember

Előadások

- BARKVED, O et al.: Valhall Field – Still on Plateau after 20 Years of Production; Presentation at Offshore Europe 2003 held in Aberdeen, UK, 2003 szeptember 2-5, SPE 83957
- LACHANCE, D. P.; ANDERSEN, M. A.: Comparison of Uniaxial Strain and Hydrostatic Stress Pore-Volume Compressibilities in the Nugget Sandstone; SPE 11971, presented at the 58th SPE Annual Technical Conference and Exhibition, , San Francisco, 1983. október 6-9.
- SMITH, B. A. et al.: Ekofisk 4D Seismic - Influence on Flow Simulation and Compaction Modeling; OTC 14149, Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 2002. május 6-9.

Szabványok

ASTM D 4525-04 (2004): Standard Test Method for Permeability of Rocks by Flowing Air.

ASTM D 4543-07 (2007): Standard Practices for Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances.

DIN EN 1936 (1999): Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität.

Internetes forrás

[1] http://en.wikipedia.org/wiki/Ekofisk_oil_field#cite_note-info-4;

Letöltés ideje: 2011-10-09

[2] <http://ner.com/core-measurement-services/pore-volume-compressibility.html>;

Letöltés ideje: 2010-09-30

8. ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra:	(a) Kőzet-, (b) mátrix-, (c) pórustérfogat	3
2. ábra:	A palástnyomás és a pórustér összenyomhatósága közötti kapcsolat	4
3. ábra:	Alakváltozások a labormérések során az 1. táblázat alapján	6
4. ábra:	Hidrosztatikus mérőberendezés sematikus vázlata Zimmerman (1991) alapján	7
5. ábra:	Ödométer	9
6. ábra:	Permeaméter	13
7. ábra:	A mérőberendezés sematikus felépítése	14
8. ábra:	A mintatest beépítése a szenzorokkal a triaxiális cellába	16
9. ábra:	A mérés menete	17
10. ábra:	Kiértékeléshez használt paraméterek	19
11. ábra:	Az I. fúrás mintáinak kompresszibilitása ($C_m=0$ esetben)	21
12. ábra:	Az I. fúrás mintáinak kompresszibilitása A_{eff} -el számolva	21
13. ábra:	A II. fúrás mintáinak kompresszibilitása ($C_m=0$ esetben)	22
14. ábra:	A II. fúrás mintáinak kompresszibilitása A_{eff} -el számolva	22
15. ábra:	A III. fúrás mintáinak kompresszibilitása ($C_m=0$ esetben)	23
16. ábra:	A III. fúrás mintáinak kompresszibilitása A_{eff} -el számolva	23
17. ábra:	Eredmény összehasonlítása irodalmi adatokkal	24

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretném megköszönni a németországi Gesteinslabor Dr. Eberhard Jahns labor munkatársainak, különösen Dr. Eberhard Jahnsnak és Hansjörg Baumgartnernek, a kompresszibilitást vizsgáló projektben való részvételt, valamint, hogy a mérési adatokat és eredményeket felhasználhattam a dolgozatban. Köszönöm konzulensemnek, Dr. Dobróka Mihály intézetigazgató egyetemi tanárnak a TDK dolgozat megírásához nyújtott szakmai segítséget. A dolgozat elkészítését a Miskolci Egyetem tudományos diákköri tevékenységét segítő TÁMOP-4.2.2.B/10/1-2010-0008 számú projekt támogatta.