

Pápay József  
az MTA levelező tagja

# Föld alatti gáztárolás porózus kőzetekben

Elhangzott 1999. február 2-án

A kőolaj- és földgázbányászat gyorsan fejlődő és egyik legfontosabb szakterülete a föld alatti gáztárolás. A technológiailag fejlett országok az évi gázfelhasználásuk 20–30%-t tárolják speciális földtani szerkezetek biztosította pórusterekben a téli, szezonális gázigények kielégítése céljából. A tárolandó gázmennyiség olyan nagy, hogy gáz tárolására más műszaki megoldás nem is képzelhető el. Egy közepes méretű gáztároló létesítéséhez  $50 \times 10^9$  Ft nagyságrendű egyszeri ráfordítás szükséges. A gáztároló üzemeltetése, az évenkénti feltöltés és a letermelés költségigénye is jelentős. Magyarország földtani adottságai a föld alatti gáztárolók létesítésére kiválóak.

A székfoglaló anyaga tudományosan bemutatja azt a nemzetközileg is elismert hazai gyakorlatot, amely alapján a tárolókat létesítik és üzemeltetik.

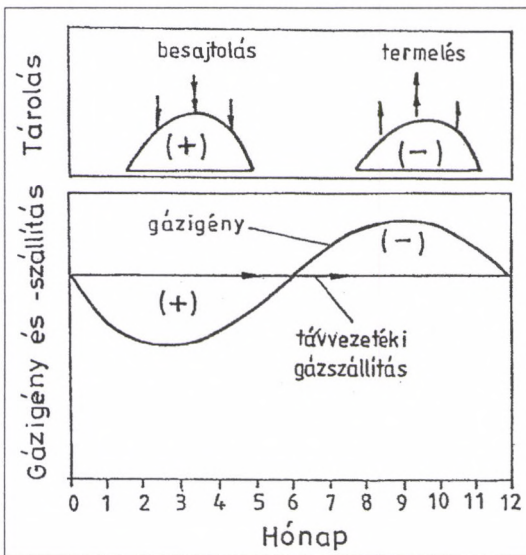
A szerző szakterülete a kőolaj- és földgáztelepek művelése és a föld alatti gáztárolás. Csaknem negyven éve foglalkozik a tudományterület különböző problémáinak megoldásával:

– a tudományos értekezései (egyetemi doktori – 1967; műszaki tudományok kandidátusa – 1974), a posztgraduális képzés diplomamunkái (1970) a konvencionális rezervoármérnöki szemlélettel szemben a geológia, a rezervoármérnöki tevékenység, a kútkiképzés, a gyűjtés, a fluidumkezelés, a szállítás és elosztás szakterületei integrálásának szükségességét elemzik kvantitatív módon (algoritmusok kidolgozása) a hatékony technológiatelepítés és -üzemeltetés céljából. Ezeknek a munkáknak az eredményeit azonnal hasznosították a hazai kőolaj- és földgáztermelés technológiai tervezésében, a techno-

lógiaik felülvizsgálatában mintegy 20 évvel megelőzve az általános nemzetközi szemléletet. Ma „reservoir management”-nek nevezik a szakterületek integrálásával történő technológiai tervezést és irányítást;

– ezt az integrált szemléletet alapozta meg és dolgozta ki (1970) a föld alatti gáztárolók létesítése, hatékony üzemeltetése céljából is. Az alapelvek, algoritmusok maradéktalanul alkalmazásra kerültek és kerülnek a hazai föld alatti gáztárolók létesítésénél, illetve az üzemeltetés felülvizsgálatában. Az alkalmazás tipikus példája a hajdúszoboszlói föld alatti gáztároló, amely jelenleg a legnagyobb, és a leghosszabb ideje üzemel. Az e tárolónál szerzett tapasztalatok meghatározóak annak a szemléletnek a kialakításánál, amely alapján a hazai tárolókat tervezik és üzemeltetik. A külföldi irodalomban a föld alatti gáztárolók fenti módon történő analízise a Tek M.R. (1987) munkásságához köthető, de az is inkább leíró jellegű;

- a rendszer matematikai leképezéséhez szükséges algoritmusok kidolgozása:
  - fluidum szűrődése kőzetekben, elsősorban kettős porozitású tárolók esetén,
  - teljesítményegyenlet bevezetése a réteg-kút-gyűjtővezeték rendszerre, gázáramlás esetén,
  - energiaegyenlet megoldása: telített és telítetlen áramló fluidumok hőmérsékletének számítása különböző kútkiképzések és felszíni vezetékrendszer esetén, valamint a kőzetek termikus paramétereinek *in situ*



1. ábra

meghatározása (műszaki tudományok doktora disszertáció – 1983) stb.;

– a művelés hatékonyságát jellemző kihozatali tényező növelése stb.

A tudományos-műszaki problémák megoldása során született eredmények nagy részét a nemzetközi irodalom is átvette. A dolgozatban csak azok az eredmények kerülnek bemutatásra, amelyek a gáztárolás komplex tudományos, műszaki analíziséhez okvetlenül szükségesek.

E tevékenység nemzetközi elismerését jelentette az, hogy

az 1997–1998. évben az SPE (Society of Petroleum Engineers) felkérésére a szerző több országban, többek között az Egyesült Államokban, a föld alatti gáztárolás témakörében mint „distinguished lecturer” előadás-sorozatot tartott.

Az első föld alatti gáztároló létesítése óta (1915, Kanada) a tárolás technológiája sokat fejlődött, a rezervoármérnöki tevékenység jól definiált, specifikus szakterülete lett, és a gázszállítás integrált részévé vált. A tároló feladata az, hogy a jelentős beruházást igénylő földgázszállító rendszer kapacitását lehetőleg egész évben maximálisan kihasználják, és a földgázigényeket kielégítsék (1. ábra).

A föld alatti gáztárolók létesítése jelentős pénzügyi forrás felhasználását követeli meg. A beruházási ráfordítás mintegy 50%-át a párnagáz jelenti.

## 1. A föld alatti gáztárolás lényege és a tárolás fő szempontjai

### 1.1. Általános szempontok

A földtani adottságoktól függően a gáztároló telepítése történhet a gázfogyasztó hely közelében vagy attól távol. Az utóbbi esetben a tárolót távvezeték köti össze a fogyasztási helyekkel. Az első esetben „fogyasztóhelyi típusú”, míg a második esetben „mezőbeli típusú” a gáztároló. A gázigények kielégítése szerint lehet „alapterhelésű” (közel állandó a termelés) és „csúcsterhelésű” (nagy a termelési ütem változása).

A föld alatti gáztároló létesülhet:

- leművelt szárazgáztelepben,
- leművelt gázcsapadéktelepben,
- leművelt kőolajtelepben,
- aquiferben és
- mesterségesen létesített sóüregben.

A sorrend egyúttal kifejezi a gazdaságosság sorrendjét is. Gáztároló létesítésére a legkedvezőbbek a szárazgázt tartalmazó telepek. A gázcsapadék-, illetve kőolajtelepekben létesített gáztároló esetén kétfázisú áramlás léphet fel, ami kedvezőtlen, és speciális módon kell megoldani a szállításra kerülő gáz előkészítését is. Bizonyos esetekben javíthatja a tárolás gazdaságosságát a leválasztott gázcsapadék, a többletolaj termelése.

Az aquiferben történő tárolás esetén már egyéb speciális szempontokat is figyelembe kell venni, ezért a tárolás már jóval drágább. A sókavernákban létesített tároló kis volumenű gáz tárolását teszi lehetővé, de a kapacitása, a kivételi ütem nagy.

Amennyiben leművelt kőolaj- és földgáztelepekben és aquiferben történik a tárolás, akkor a földtani szerkezettel szemben támasztott követelmény a következő:

- a szerkezetnek legyen zárása,
- megfelelő póruster álljon rendelkezésre,
- a kőzet legyen permeábilis, és biztosítsa az adott ütemű gázkivételt,
- a fedőkőzet zárjon, akadályozza meg a gázvesztiséget (ne legyen permeabilitása, és a tároló teljes területén összefüggő legyen).

Amennyiben aquiferben történik a tároló létesítése, akkor meg kell győződni arról, hogy a fenti követelmények teljesülnek-e. Ezek a vizsgálatok felölelik a földtani kutatás minden fázisát (szeizmika, fúrás stb.), kútvizsgálatokat (permeabilitás meghatározása víztermeléssel stb.), laboratóriumi méréseket stb.

Alapos vizsgálatok ellenére, aquifer esetén, még mindig fennáll annak a kockázata, hogy a fedőkőzet integritása nem biztosított.

Általában az aquiferben történő tárolás 2-3-szor drágább, mint a leművelt telepekben, mivel az utóbbi esetén a tárolóval szembeni, tárgyalat követelmények már a létesítés előtt ismertek, és így nincs szükség a költséges kutatásokra, vizsgálatokra.

## 2. Földgáztároló áramlási rendszere és főbb jellemző paraméterei

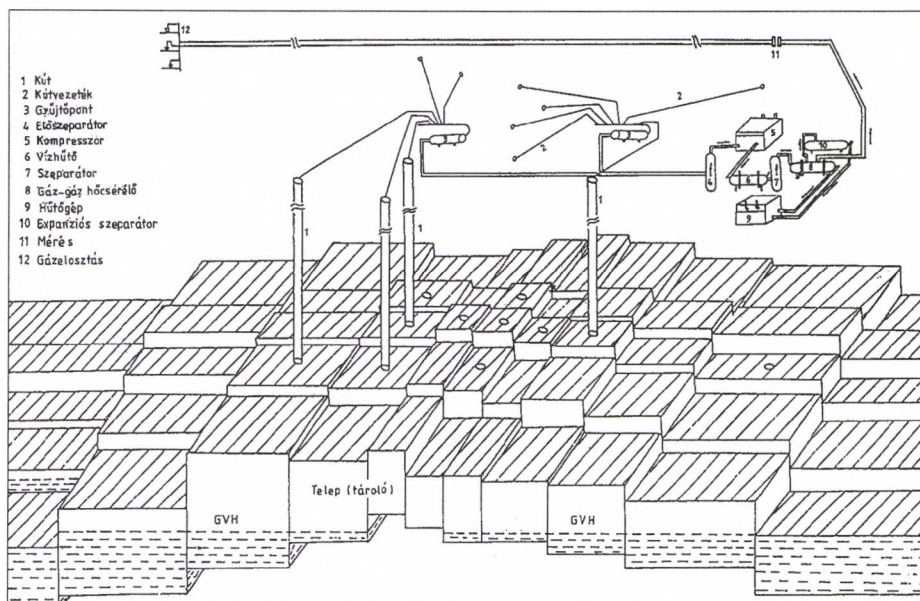
### 2.1. Föld alatti gáztároló komplex áramlási rendszere

Egy föld alatti gáztároló axonometrikus áramlási rendszerét a 2. ábra szemlélteti. A numerikus modellszámításokkal rendszerint ezt a rendszert szimulálják (l. Függelék).

A föld alatti gáztárolás lényegének megértése és a főbb jellemző paramétereinek meghatározása céljából egy egyszerűbb modell kerül vizsgálatra. A 3. ábra szemlélteti a vizsgálatra kerülő tároló-komplexum áramlási rendszerét. Ezt a technológiai sémát 1970-ben Pápay J. elemezte, és ő dolgozta ki azt az algoritmusrendszert, amely a föld alatti gáztárolóink (földgáztelepeink) tervezését megalapozta, és alapja lett a mai tervezési és elemzési gyakorlatnak.

Tételezzük fel azt, hogy a föld alatti gáztároló egy leművelt gáztelepben (1) létesült. A tároló lehet zárt vagy hidrodinamikailag egy víztesttel (aquifer) összefüggő. Télen a gázt a kutak (2) és a gázvezetékek segítségével (3) termelik. A gázt a gyűjtőpontban (4) szeparálják. A gázt előhűtik, mielőtt az alacsony hőmérsékletű gázkezelő rendszerbe áramlik (7, 8, 9, 10).

## Föld alatti gáztárolás porózus kőzetekben



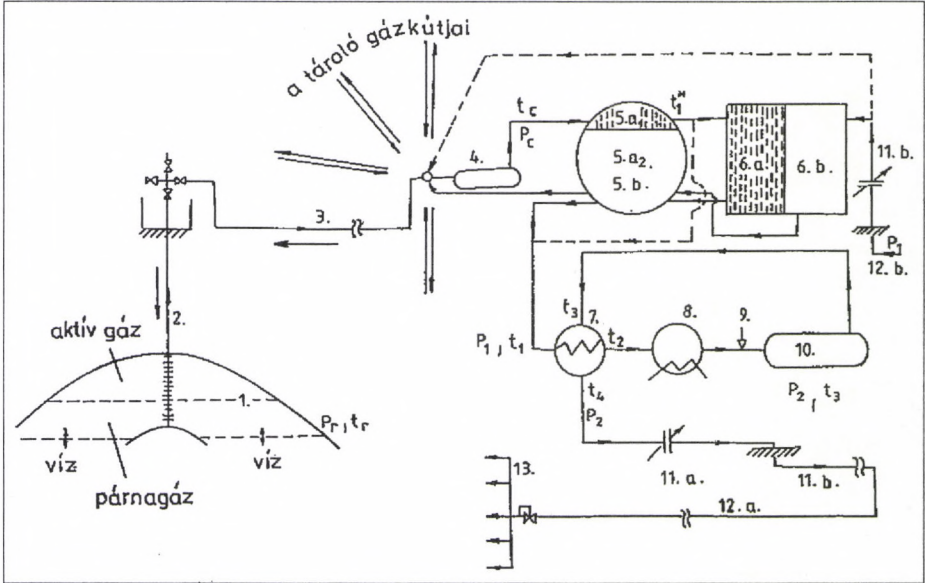
2. ábra

A termelt gázt komprimálják (6a), ha szükséges ( $p_c < p_2$ ). A komprimálás miatt a gáz felmelegszik, ezért a hőmérsékletét víz- vagy léghűtéssel (5a<sub>2</sub>) csökkentik. Az alacsony hőmérsékletű szeparálás berendezései: gáz-gáz hőcserélő (7), mesterséges hűtőegység (8), expanziós szelep (9) és szeparátor (10). A szeparátorban a vizet, a gázolint és az inhibitort (pl. metanol, glikol stb.) leválasztják, és így biztosítják a megfelelő harmatpontú gázt a távvezetéki szállításra.

Az előkészítendő gáz harmatpontját a gáztávvezeték indítónyomása (előkészítés nyomása), a gázelosztó rendszer nyomásviszonyai és az éghajlati körülmények határozzák meg (Pápay, 1967 – ez a munka alapozta meg a hazai szabvány előírást a gázharmatpontot illetően).

A gáztermelés technológiája a gáz összetétele (szárazgáz, nedvesgáz, gázkondenzátum, oldott gáz vagy savanyú gáz) és a rétegyomás függvénye. Az általánosan alkalmazott gáztermelési technológiák: alacsony hőmérsékletű szeparálás (Joule–Thomson-effektus vagy gázturbina mesterséges hűtőegységgel kiegészítve), glikolos és adszorpciós gázszárítás.

Nyáron a felesleges gázt (12b) mérés (11b) után komprimálják (6b), majd lehűtik (5b), ezután a kutakhoz szétosztják (4), ezt követően a gázvezetéken (3) és a kutakon keresztül (2) visszasajtolják a tárolóba (1).



3. ábra

Az aquiferben létesített föld alatti gáztároló áramlási rendszere megegyezik az előzőekben ismertekkel, azzal a különbséggel, hogy sokkal több idő kell a kifejlesztésére (5–10 év).

## 2.2. A tároló fő paraméterei

Pápay J. (1970) elemezte és meghatározta a föld alatti gáztárolás hatékonyságát befolyásoló legfontosabb paramétereket, a 3. ábra szerinti föld alatti gáztároló áramlási sémája alapján. Arra a következtetésre jutott, hogy a tároló legfontosabb paramétere a párnagáz mennyisége, amely a tároló nyomását és aquifer esetén a gázos pórusrétegfogat nagyságát biztosítja. A következő fejezet részben ezt a megállapítást igazoljuk a szerző szerinti analízis alapján.

### 2.2.1. Telepnyomás

Az egyszerűség és az áttekinthetőség miatt a vizsgálatot az anyagmérleg segítségével végezzük el.

Az anyagmérleg (Pápay,1970) a termelési ciklusban:

$$V = [Q_c + Q_i - \int q_p(t)dt] B_g + (W_c - W_p)_p, \quad (1)$$

ahol:

$$B_g = \frac{z}{z_o} \frac{p_o}{p_e} \frac{T}{T_o}$$

$$W_e = B \Sigma \Delta p Q(t_D)$$

ha  $B_g = B_g^* \frac{z}{p}$ , akkor az (1) egyenlet a következő alakú lesz, ha azt a tárolási ciklusban a nyomásra fejezzük ki:

$$\left(\frac{p}{z}\right)_{ep} = B_{gp}^* \frac{Q_c + Q_i - \int q_p(t) dt}{V + \left[W_p - B \sum \Delta p Q(t_D)\right]_p} \quad (2)$$

Meg kell jegyezni azt, hogy  $z = z(p)$ ,  $W_e = W_e(p)$ .  
A termelési ciklus végén:

$$Q_i = \int g_p(t) dt,$$

így a besajtolási ciklusban az átlagnyomás (Pápay, 1970) a következő:

$$\left(\frac{p}{z}\right)_{ci} = B_{gi}^* \frac{Q_c + \int g_i(t) dt}{V + \left[W_p - B \sum \Delta p Q(t_D)\right]_i} \quad (3)$$

### 2.2.2. Teljesítményegyenlet

Egy gázkút (amely lehet az ún. átlagkút is) teljesítménye Forchheimer P. (1901) négyzetes összefüggése szerint a következő:

$$p_e^2 - p_{wb}^2 = \pm(AQ + BQ^2). \quad (4)$$

Az A és B állandókat mérésekkel határozzák meg.

A (+) jel a termelést, a (-) besajtolást jelenti.

A nyomáscsökkenés a termelőcső mentén Katz D. L. et al. (1959) összefüggése segítségével határozható meg:

$$p_{wb}^2 - F_{wh}^2 = \pm(DQ^2). \quad (5)$$

A gázvezetéken (bekötővezeték) a nyomásvesztés Weimouth T. R. (1912) után a következő összefüggésből számítható:

$$p_{wh}^2 - p_c^2 = \pm EQ^2. \quad (6)$$

A (4, 5) és (6) egyenleteket összevonva, a tároló és gyűjtőponti (elosztó-pont) nyomás közötti összefüggés a következő:

$$p_e^2 - Fp_c^2 = \pm[ AQ + Q^2 (B + D + FE)]. \quad (7)$$

Ha  $B' = B + D + FE$ , akkor (7) egyenlet a következő alakban írható:

$$p_e^2 - Fp_c^2 = \pm(AQ + B'Q^2). \quad (8)$$

Mivel a (4) egyenlet felírható E. L. Rawlings és M. A. Schelhardt (1936) empirikus, ún. exponenciális formulájával is:

$$Q = C[\pm(p_e^2 - p_{wb}^2)]^n,$$

ebből következően (8) egyenlet más alakban az alábbi:

$$Q = C'[\pm(p_e^2 - Fp_c^2)]^{n'}. \quad (9)$$

Ha a kút kapacitásokat az átlagteljesítménnyel jellemezzük, akkor a föld alatti gáztároló teljesítményegyenlete két formában a következő:

$$q = k \left[ \frac{-A + \sqrt{A^2 \pm 4B'(p_e^2 - Fp_c^2)}}{2B'} \right] \quad (10a)$$

$$q = kC'[\pm(p_e^2 - Fp_c^2)]^{n'}. \quad (10b)$$

Megjegyzés: (4) egyenlet mint „európai módszer” ismeretes, és szilárd elméleti alapokon került kidolgozásra (pl. az orosz szakirodalom csak ezt használja), addig a Rawlings–Schelhardt-összefüggés empirikus, és az irodalomban mint „észak-amerikai egyenlet” ismeretes. Jelenleg az angol irodalom mindkét formulát alkalmazza.

Egy adott hozamtartomány között mindkét egyenlet jó közelítéssel ugyanazt az eredményt adja. Ha az egyik egyenlet ismeretes, akkor abból a másik kiszámítható. A (4) egyenlet mind mérésekkel, mind pedig elméleti számításokkal meghatározható, ha ismertek a réteg paraméterei. Kis áteresztőképesség esetén az  $A$  értéke az idő függvénye. A (10) egyenlet szerint a föld alatti gáztároló besajtolási és termelési kapacitása függvénye a kutak számának ( $k$ ), a rendszer (réteg, termelőcső, gázvezeték) keresztmetszetének ( $C'$ ,  $n'$ ) illetve ( $B'$ ), a rétegparamétereknek ( $A$ ) valamint rétegnomásnak ( $p_e$ ) és a gyűjtőponti (elosztási) nyomásnak ( $p_c$ ). A (8), (9), (10a) és (10b) egyenleteket Pápay J. vezette le 1969–1970-ben (posztgraduális diploma), és 1971-ben mezőben mérésekkel alkalmazhatóságukat ellenőrizte.



Az összefüggéseket az 1. táblázatban foglaltuk össze.

1. táblázat

Rendszer	Másodfokú formula	Exponenciális formula	Megjegyzés
Réteg	$p_c^2 - p_{wb}^2 = AQ + BQ^2$	$Q = C(p_c^2 - p_{wb}^2)^n$	Kétparaméteres egyenlet
Réteg-termelőcső	$p_c^2 - Fp_{wb}^2 = AQ + B_1Q^2$	$Q = C_1(p_c^2 - Fp_{wb}^2)^{n_1}$	Háromparaméteres egyenlet
Réteg-termelőcső-hálózat	$p_c^2 - Fp_c^2 = AQ + B_2Q^2$	$Q = C_2(p_c^2 - Fp_c^2)^{n_2}$	Háromparaméteres egyenlet
Gáztároló komplexum	$q = k \left[ \frac{-A + \sqrt{A^2 \pm 4B_2(p_c^2 - Fp_c^2)}}{2B_2} \right]$	$q = kC_2[\pm(p_c^2 - Fp_c^2)]^{n_2}$	Négyparaméteres egyenlet

### 2.3. Párnagáz

A (2), (3) és a (10) egyenlet azt igazolja, hogy a tároló és a gyűjtőponti nyomás a párnagáz mennyiségétől függ.

Ha az aktív gáz mennyisége adott, akkor a párnagáz mennyisége (Pápay, 1970) meghatározza:

- a kutak számát (a kútkapacitás a rétegnyomás függvénye),
- a gázelőkészítő egység fő paramétereit,
- a termelési ciklusban a minimális nyomást és ha szükséges, a termelést biztosító kompresszorkapacitást,
- a besajtoláskor fellépő maximális nyomást és ha szükséges, a besajtoláskor a kompresszorteljesítményt, valamint a fedőkőzet áteresztését vagy felrepedését okozó túlnyomás létrejöttét,
- aquiferben történő tárolás esetén a gázos póruster nagyságát (az aquifer-víz mozgása a telepnyomás függvénye),
- a gázvesztések nagyságát (pl. maradék telítettség, migrációs és repesztési veszteségek stb.).

#### 2.3.1. Kútszám mint a párnagáz mennyiségének függvénye

Amennyiben a depresszió ( $\Delta p = p_c - p_{wb}$ ) állandó, és értékét a tárolókőzet-kihordás megakadályozásának feltétele vagy vízkúposodás vagy gazdaságosság (Pápay, 1971) határozza meg, akkor a kútkapacitás a következő egyenlettel számolható:

$$Q = C(2p_c \Delta p - \Delta p^2)^n. \quad (11)$$

A (11) egyenletből megállapítható, hogy a kút kapacitást a párnagáz mennyisége határozza meg, mivel  $p_e = p_e(Q_c)$ . Ha a tárolás napi termelési vagy besajtolási üteme ( $q$ ) adott, és a  $\Delta p$  ismert, akkor a kutak ( $k$ ) száma:  $k = q/Q$ . Mivel  $Q = Q(Q_c)$ , ezért  $k = k(Q_c)$ .

Legkisebb a rétegyomás a letermelés végén, és így a kút kapacitás is.

### 2.3.2. A hűtőegység- (chiller) kapacitás és a párnagáz mennyiségének összefüggése

Ha a tároló nyomása nagy, vagy a tárolót gázkondenzátum- vagy leművelt olajtelepben létesítették, akkor a gáz távvezeték szállításához való előkészítésére rendszerint alacsony hőmérsékletű szeparálást alkalmaznak.

Ha a gyűjtőponti nyomás nagyobb, mint az alacsony hőmérsékletű szeparátor nyomása, akkor az expanziós szelepnél létrejövő nyomáscsökkenést (Joule–Thomson-hatás, esetleg turbina) alkalmazzák a gáz hűtésére, chillerrel kiegészítve.

A teljes hőmérséklet-csökkenés értékét ( $\Delta t = t_1 - t_3$ ) meghatározza a gáz szállításához szükséges harmatpont ( $t_3$ ), és azt a beépített hűtőegység és/vagy a gázexpanzió biztosítja.

A mesterséges hűtőegységgel létrehozandó hőmérséklet-csökkenés (Pápay, 1967, 1968) értékét a következő egyenlettel számolhatjuk:

$$\Delta t = \frac{(t_3 - t_1)(1 - a)}{ae^{c_{p1} m_1 \left(1 - \frac{1}{a}\right)} - 1} - \mu(p_c - p_p), \quad (12)$$

ahol  $\Delta t = \Delta t(Q_c)$ , mert  $p_c = p_c(Q_c)$

$$a = \frac{c_{p2} m_2}{c_{p1} m_1}.$$

A (12) egyenletből megállapítható, hogy minél nagyobb a telepnyomás (minél nagyobb a párnagáz mennyisége), annál kisebb hőmérséklet-csökkenést kell létrehozni a hűtőegységgel.

### 2.3.3. A kompresszorkapacitás és a párnagáz mennyiségének összefüggése

A kompresszor a föld alatti gáztárolás egyik alapvető eszköze. Feladata a gáz besajtolása a tárolóba és /vagy kitermelése a tárolóból. Általában célszerű az adott teljesítményt mindkét feladat számára igénybe venni.

A kompresszorozás miatt a gáz felmelegszik. A kompresszorozás hatásfokának javítása és a csővezetékek megnyúlásának elkerülése miatt a gázt lehűtik.

A kompresszor kapacitása a következő (Katz et al., 1959 vagy Tek M. R. 1987), ha egységnyi mennyiségű gázt (1 bar, 15 °C) egységnyi idő alatt komprimálnak:

$$N = \frac{1}{\eta} C \frac{\chi}{\chi - 1} T_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\chi-1}{\chi}} - 1 \right]. \quad (13)$$

Kompresszorozás után a gáz hőmérséklete (Katz et al., 1959) az alábbi egyenlet segítségével határozható meg :

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\chi-1}{\chi}}. \quad (14)$$

A (13) és (14) egyenletben a termelési ciklusban  $p_1 = p_c = p_c(Q_c)$ , a besajtolási ciklusban  $p_2 = p_c = p_c(Q_c)$ .

A (13) és (14) egyenlet alapján megállapítható, hogy a gáz hőmérsékletét mind a beépítendő kompresszor kapacitása, mind a gázhűtő teljesítménye (víz vagy levegő), a gyűjtőpont (elosztó központ) nyomása határozza meg, amely a párnagáz mennyiségének a függvénye.

#### 2.3.4. A tárolótérfogat és a párnagáz mennyiségének összefüggése

Amennyiben a tároló víznyomásos, akkor az (1) és (3) egyenlet alapján közvetve megállapítható, hogy a tárolóba be- és kiáramló víz mennyisége, amely a gáztároló gázos pórustérfogatát, azaz a tároló nagyságát befolyásolja, a párnagáz mennyiségének a függvénye. Mindamelllett a párnagáz feladata a letermelési ciklus végén az aquiferből kiáramló víz távol tartása a termelő kutaktól és az előírt gázmennyiség kiadásához szükséges rétegnomás biztosítása.

#### 2.3.5. A gázvesztesség és a párnagáz mennyiségének összefüggése

Ha tároló nyomása nő, akkor annak a lehetősége is nagyobb, hogy a fedőkőzeten vagy akár a cementpaláston a gáz átszivárog. Ha pl. 30 év üzem után a tárolás befejeződik, akkor a párnagáz egy része nem termelhető vissza. A gázvesztesség annál nagyobb, minél nagyobb a felhagyási nyomás. Aquifer tároló

esetén nagyobb kezdeti nyomásnál nagyobb lesz a felhagyási nyomás- és így a gázvesztés is.

A gyakorlatban a párnagáz részaránya az összes tárolt gázhoz (párnagáz + aktív gáz) viszonyítva a következő:

A gáztároló hidrodinamikai rendszere	
zárt (nincs aquifer)	víznyomásos
$\frac{1}{4} - \frac{1}{2}$	$\frac{1}{2} - \frac{2}{3}$

### 3. A gáztároló tervezése

Amennyiben a megfelelő földtani szerkezet rendelkezésre áll, akkor a feladat egy olyan tároló megépítése, amely segítségével a gázt minimális költséggel tudjuk biztosítani a fogyasztónak.

#### 3.1. Maximálisan alkalmazható rétegyomás

A tároló egy minimális és egy maximális nyomás között üzemel. Ez a két nyomás határozza meg az éves és a napi kapacitásokat. A maximális nyomás értékét korlátozza a repesztés és/vagy a küszöbnyomás. A tárolókőzet (pl. márga, mészkő, dolomit stb.) igen kis permeabilitással rendelkezhet. Ha a tároló kőzet vízzel telített, akkor a kapilláris erők megakadályozzák a gáz fedőkőzeten keresztül történő migrálását. Egy adott nyomáskülönbség esetén (küszöbnyomás) a gáz kiszorítja a kapillárisokból a vizet, és a kőzet áteresztő lesz.

Mind a repesztési nyomást, mind pedig a küszöbnyomást a kőzetmagon végzett laboratóriumi mérésekkel határozzák meg. A maximális „delta nyomás” (maximális üzemyomás mínusz a kezdeti nyomás) sok tényező függvénye. A deltanyomás értékét minden esetben a fedőkőzet tulajdonságától függően meg kell határozni.

#### 3.2. A párnagáz mennyisége

Ha a tárolandó gáz mennyisége ismert, akkor a párnagáz mennyiségét meg kell határozni. Tetszés szerint felveszünk egy párnagáz mennyiséget, és kiszámoljuk a maximális és minimális nyomást. A legfontosabb, nyomástól függő paraméterek: kútkapacitás, kúthálózat, kútszám, csőméretek (termelőcső, bekötővezeték), a gázkezelő egység paraméterei (szeparátorok, hűtők stb.) és a kompresszor teljesítmény.

Több, négy-öt felvett párnagázmennyiségnél megtervezzük a komplex föld alatti gáztárolót. Az a változat javasolható, amelynél a tárolás művelési-gazdasági szempontból a legkedvezőbb. A tervezés pontosítható azzal – amennyiben lehetőség van a magasnyomású távvezeték indítónyomásának a változtatására –, hogy a távvezeték indítónyomását is változtatva végezzük el a rendszer műszaki-gazdasági optimalizálását (Pápay, 1972).

### 3.3. Optimális termelő-besajtoló rendszer

A földgáztároló hatékonysága függ a termelőcsövön, a bekötővezetéken létrejövő nyomásvesztéstől. Felesleges vagy többlet nyomáscsökkenés igen sokba kerülhet. A tároló nagyságától és paramétereitől függően 1 bar többletnyomás-csökkenés azt eredményezheti, hogy  $50\text{--}100 \times 10^6 \text{ m}^3$  gáz a tárolóból nem termelhető ki.

Ha a rendszer jól tervezett, akkor a nyomáscsökkenés minden kút esetén gyakorlatilag azonos a vezetékeken.

Mivel a kút kapacitás kutanként különböző, ezért a vezeték méreteknek (termelőcső, bekötővezeték) is különbözőnek kell lenniük az azonos nyomásvesztés feltételezés esetén (Pápay et al., 1985):

az  $i$ . kút termelőcsövének átmérője:

$$d_i = \bar{d} \left( \frac{Q_i}{Q} \right)^{\frac{2}{5,33}}, \quad (15)$$

az  $i$ . kút bekötővezetékének átmérője:

$$d_i = \bar{d} \left( \frac{L_i}{L} \right)^{\frac{1}{5,33}} \cdot \left( \frac{Q_i}{Q} \right)^{\frac{2}{5,33}}. \quad (16)$$

A (15) és (16) egyenletekben az  $i$ . index jelöli a tetszőleges, míg a felülvonás (–) a referenciakút adatait (pl. átmérő, termelési ütem, bekötővezeték hossza). Az így minden kútra meghatározott csővezeték-átmérekkel biztosítjuk azt, hogy a nyomáscsökkenés közel azonos legyen minden kút termelőcsövére és bekötővezetékére vonatkoztatva.

### 3.4. A gáz kivétel üteme

A maximális gáz kivétel függvénye a pillanatnyi rétegnomásnak, a tárolókőzet konszolidációjának, a kút kapacitásoknak, a telep hidrodinamikai rend-

szerének ( pl. vízkúposodás) és a kutak számának stb. Általában az aktív gáz mennyiségének az aránya a napi maximális gáztermeléshez: 50–75 nap.

## 4. Föld alatti gáztároló üzemeltetése

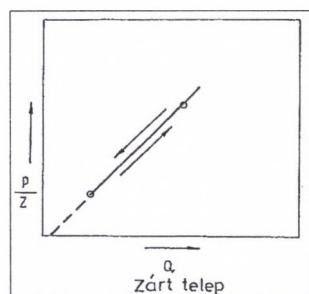
### 4.1. Tárolódiagnosztika

A föld alatti gáztároló üzemeltetése a termelőmérnök és a rezervoármérnök közös felelőssége. A termelőmérnök felelős a mindennapi üzemeltetésért: pl. a kutak javítása, a gáz gyűjtése, kezelése, a kompresszorok üzemeltetése; nyomásméréseket végeztet, és gyűjti a rezervoármérnök számára szükséges adatokat stb. A rezervoármérnöki team elemzi a tárolóval kapcsolatos adatokat, különböző javaslatokat készít a tárolás hatékonyságának növelésére. Az utóbbi a megfigyelőrendszer adatain alapszik. A nagy besajtolási és kivételi ütem miatt a nyomás és telítettség jelentősen, néha drasztikusan változik.

A tárolás technológiájának ellenőrzése, szabályozása miatt és azért, hogy megértsük a folyamatokat, egy megfigyelőrendszert kell kiépíteni. Megfigyelőkutakat fúrnak (vagy a régi kutakat használják) a gáztelített, az átmeneti zónába és magába az aquiferbe. A fedőkőzet zárása alapvető, ezért mindenképpen javasolt megfigyelőkutak telepítése a fedőkőzet feletti rétegbe vagy rétegekbe. Igen gyakran a föld alatti gáztároló felett olaj- és gáztelepek találhatóak, amelyek a tárolás szempontjából komplett izolációt jelentenek, és felfogják az esetlegesen alulról felfelé migráló gázt is.

A megfigyelőrendszerhez tartozónak kell tekinteni a besajtoló és a termelő kutakat is. A tárolódiagnosztika, illetve a föld alatti szerkezet kontrollja a rezervoármérnök feladata.

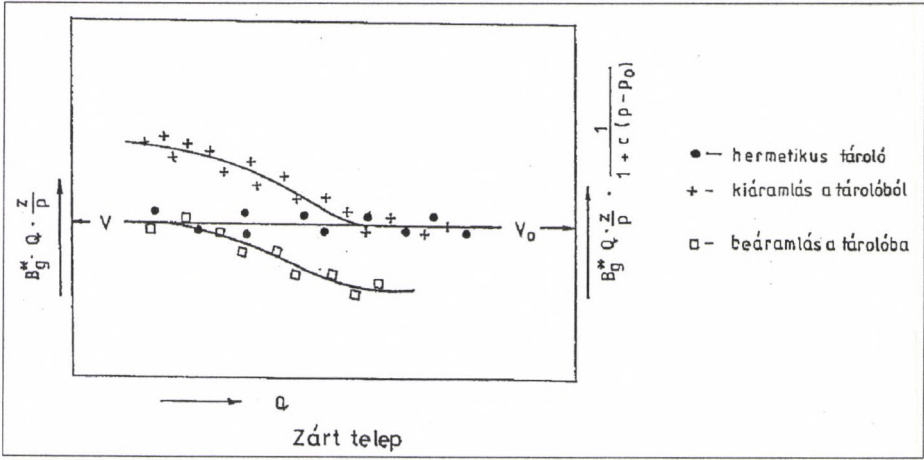
Az alábbiakban a tárolódiagnosztika alapjait az anyagmérleg segítségével mutatjuk be.



4. ábra

Ha a tároló hidrodinamikailag zárt (azaz nincs aquifer), akkor a  $\frac{p}{z}$  lineáris függvénye (ha nincs meghibásodás) a tárolóban lévő gáz mennyiségének, azaz  $(Q)$ -nak, és az egyenes az origón halad keresztül (4. ábra).

Ha a kezdeti pórusterfogatot fejezzük ki, és a telep zárt, attól függően, hogy a kompresszibilitást figyelembe vesszük-e vagy sem, akkor ha  $B_i Q_p^z$ -t a  $Q$  függvényében vagy a  $B_i Q_p^z \frac{1}{1+c(p-p_s)}$ -t a  $Q$  függvényében ábrázoljuk, akkor a mért értékek egy vízszintes egyenesen helyezkednek el.

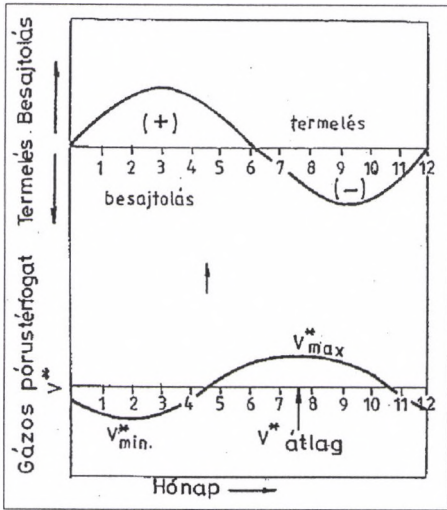


5. ábra

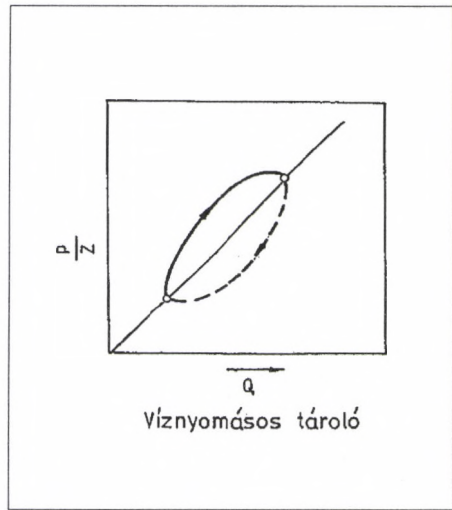
Ellenőrizetlen tárolóba való be- vagy kiáramlás esetén egy anomália figyelhető meg (5. ábra).

Ha a tároló víznyomásos, akkor a vízmozgás befolyásolja a tárolótérfogatot.

A tárolóba be- és kiáramló víz mennyisége az aquifer paramétereinek a függvénye: az aquifer pórustérfogatának, vastagságának és permeabilitásának



6.a ábra



6.b ábra

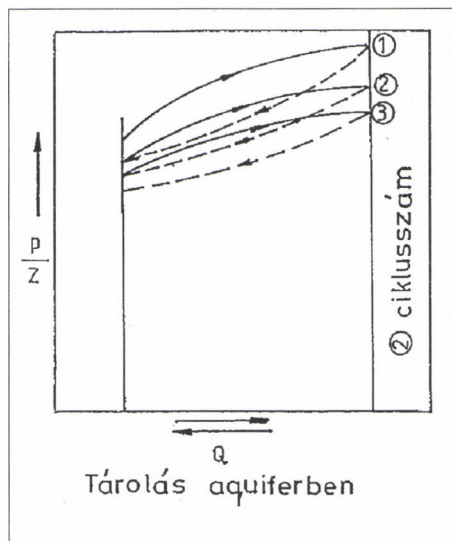
stb. Közepes vagy kis aquifertranszmisszibilitás esetén a víz mozgása fáziseltolódásban van a gáztárolóban való gáz mozgásához képest, ez a fáziseltolódás a  $\frac{p}{z}-Q$  függvény hiszterézisét okozza (6a. és 6b. ábra).

A tárolóba (tárolóból) történő vízmozgást két, egymásra szuperponáló hatás befolyásolja:

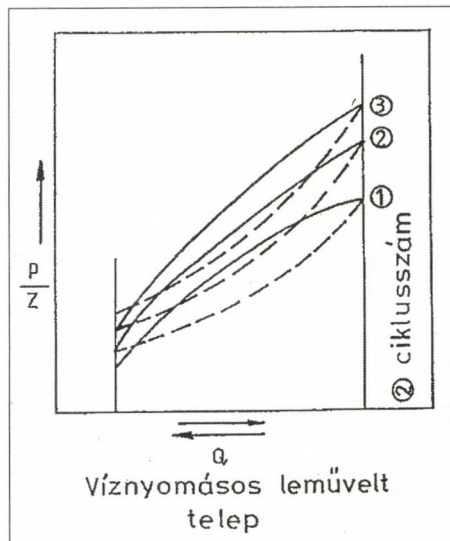
- az adott tárolási ciklusban a termelés és besajtolás miatti nyomásváltozás (rövid ideig történő hatás),
- az átlagos tárolási nyomás és a kezdeti aquiferfnyomás különbségéből (hosszú ideig történő hatás) adódó hatás.

Az utóbbi határozza meg azt, hogy a gázos pórusterfogat (gázbuborék) nő vagy csökken hosszú távon a tárolási idő függvényében (7. és 8. ábra).

Amennyiben a gáztároló hidrodinamikailag az aquiferrel összefügg, akkor a rezervoármérnöknek elemeznie kell a megfigyelési rendszer, a termelő-be-sajtoló kutak adatait (nyomás, telítettség, víztermelés stb.), úgy, hogy egyidejűleg különböző modelleket ( $p/z$  függvény, anyagmérleg, numerikus modell stb.) használ azért, hogy meghatározza a tárolási folyamat anomáliáinak az okait.



7. ábra



8. ábra



## 4.2. Kútdiagnosztika

A föld alatti gáztároló Achilles-sarka a kút, ahol is a réteg és a fúróluk átmet-szi egymást, mivel itt a gázsebesség a legnagyobb, és a termelés és besajtolás miatt az igénybevétel félciklusonként változik.

A tároló-ellenőrzés, kútdiagnosztika alapvető eszköze a termelési kútszelvényezés: a zaj, a cementpalást, a természetes gamma-sugárzás, a sűrűség, a hőmérséklet-szelvényezés és az áramlásmérés stb.

Mivel a kút jelentős beruházási költséget jelent, ezért a termelő és rezervoármérnöknek alapvető feladata a kútállapot rendszeres felülvizsgálata. Félig konszolidált vagy nem konszolidált tárolókőzetek esetén gyakran előfordul a szilárd részek, a tárolókőzet kihordása, aminek az eredménye: termeléscsökkenés, erózió és végső soron a gázkitörés stb. Ebből az következik, hogy alapvető követelmény a kútáramban az esetleges szilárd részek megfigyelése, kimutatása.

A szilárd kőzetrészek jelenlétét a kútáramban a változó igénybevétel (besajtolás, termelés) és a kőzet kiszáradása is stb. okozhatja.

A besajtolt gáz a tárolási körülményeket tekintve telítetlen, és végül is a kúttalp környékén kiszáradja a kőzetet. Laboratóriumi mérések igazolják, hogy néhány kőzet konszolidáltsága a kiszáradással csökkenhet.

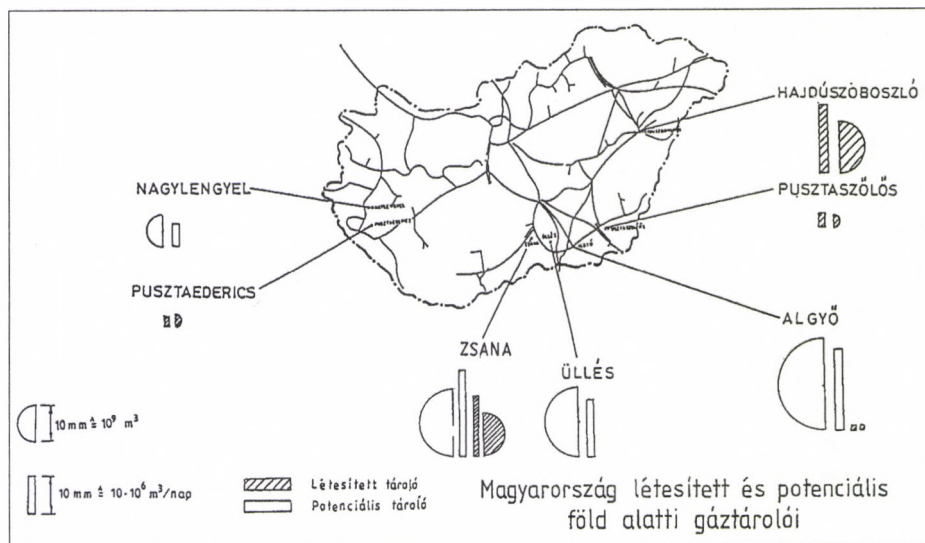
## 5. Gáztároló intenzifikálása

A gáz föld alatti tárolása igen költséges művelet, ezért alapvető cél a tárolási költségek csökkentése a gázigények kielégítése mellett. A gáztároló intenzifikálásának több módszere ismert: a „delta” nyomás (a maximális tárolónyomás és a kezdeti telepnymomás különbsége) növelése, a párnagáz mennyiségének csökkentése, a sűrűségi veszteségek csökkentése, inertgáz párnagázként való alkalmazása vagy a kútkapacitások növelése (horizontális kutak) stb.

## 6. Gyakorlati példa – Hajdúszoboszló

Magyarországon jelenleg a hajdúszoboszlói föld alatti gáztároló a legnagyobb, és leghosszabb ideje üzemel.

Kifejlesztése és üzemvitelének ellenőrzése megegyezik az előzőekben ismertetett szempontokkal. A létesítése és az üzemeltetése során felhasznált tapasztalat „know how” volt, és jelenleg is az alapja a többi magyar tároló létesítésének, fejlesztésének.



9. ábra

### 6.1. Földgáz mint energiaforrás Magyarországon

Magyarországon 1999-ben a hazai gáztermelés az összes igénynek a 33%-át fedezte. Gáztermelésünk folyamatosan csökken, így az import részaránya fokozatosan nő. Az import nagy része a volt Szovjetunió területéről származik. Mivel a gázigény a szezonális szerint változik, ezért elengedhetetlen a föld alatti gáztárolók létesítése.

2. táblázat

Magyar föld alatti gáztárolók 1999-ben

Tároló	Kőzet	Mélység m	Hidro-dinamikai rendszer	Párnagáz $10^6 \text{ m}^3$	Aktív gáz $10^6 \text{ m}^3$	Kapacitás $10^6 \text{ m}^3/\text{d}$	Kút db	Nyomás-intervallum bar
Hajdúszöböszlő 1978*	homokkő	955	intenzív vízbeáramlás	2266	1500	19,0	90	60–95
Pusztaszőlős 1978	homokkő	1055	merev vízbeáramlás	261	260	3,4	22	90–128
Puszttaederics 1979	homokkő	1350	zárt	310	330	2,9	33	86–143
Algyő 1990	homokkő	2000	merev vízbeáramlás	400	150	1,0	7	110–135
Zsana 1996	mész-kő	1850	részleges vízbeáram	1660	1300	18,0	42	100–145
Összes				4897	3540	44,3	194	

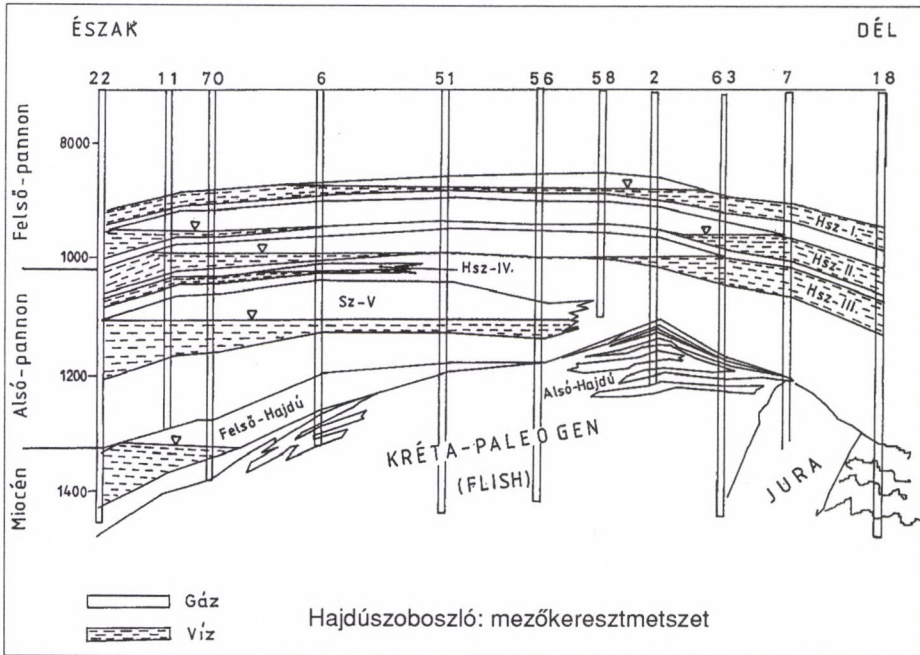
\* A tárolás kezdete

Jelenleg öt föld alatti gáztárolóval rendelkezünk, amelyek az ország különböző részein helyezkednek el. Ezek mindegyikét leművelt gáztelepekben építették ki. A 9. ábra szemlélteti a magyarországi föld alatti gáztárolók elhelyezkedését. A tárolók legfontosabb adatait a 2. táblázat tartalmazza.

## 6.2. A hajdúszoboszlói föld alatti gáztároló

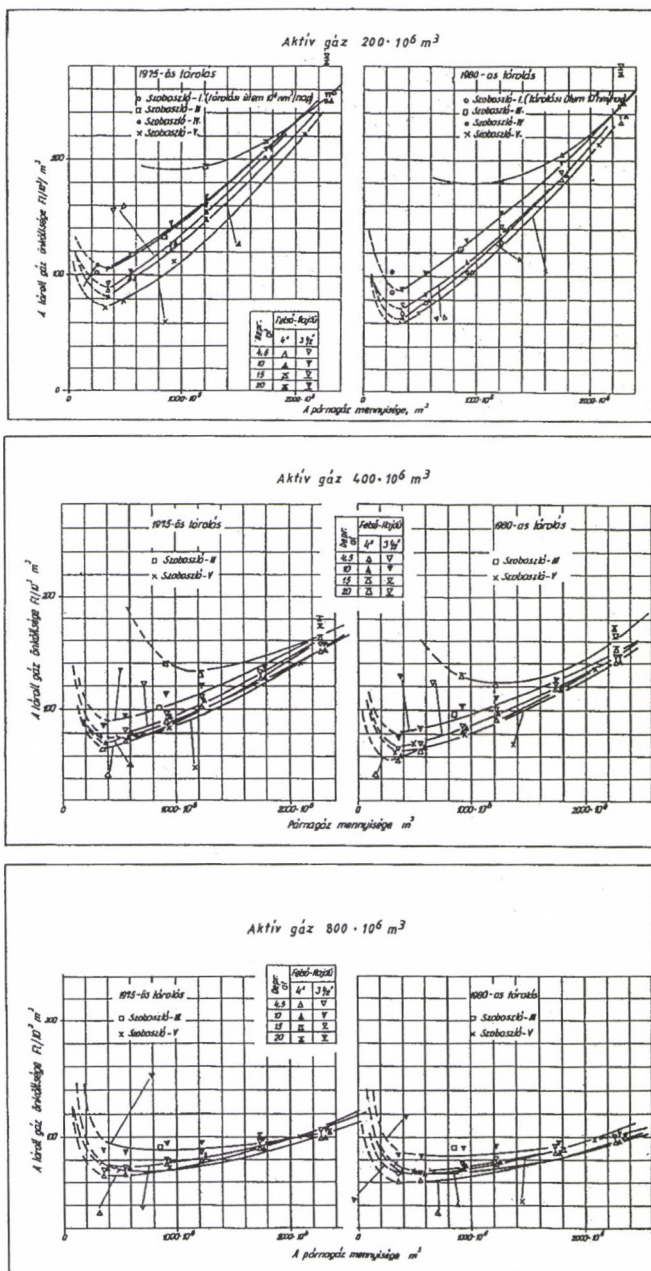
### 6.2.1. Általános áttekintés

A hajdúszoboszlói földgázmezőn hat földgáztelep helyezkedik el ugyanazon a területen, egymás alatt (l. 10. ábra). A kezdeti gázkészlet, hidrodinamikai rendszer, a kőzet litológiája, annak konszolidálási foka telepenként különböző.



10. ábra

Ahhoz, hogy a telepek közül melyik a legmegfelelőbb, részletes rezervoármérnöki elemzés végeztek: 120 különböző variációt vizsgáltak a tároló kiválasztására (Pápay-Gundel, 1971). A tárolási költségeket elemezték a párnagáz, az aktív gáz és a kutak termelési ütemének ( $\Delta p$ ) függvényében

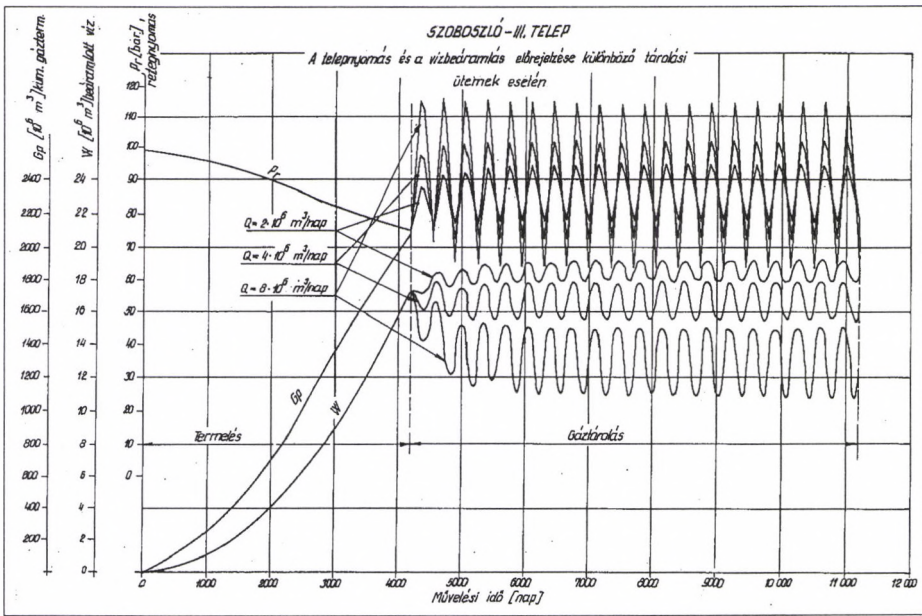


Hajdúszoboszló - III. telep

11. ábra

(11. ábra). A gazdaságossági számításokat Sipótz I. készítette. Végül is a Szoboszló-III. telepben a földgáztárolót építették ki.

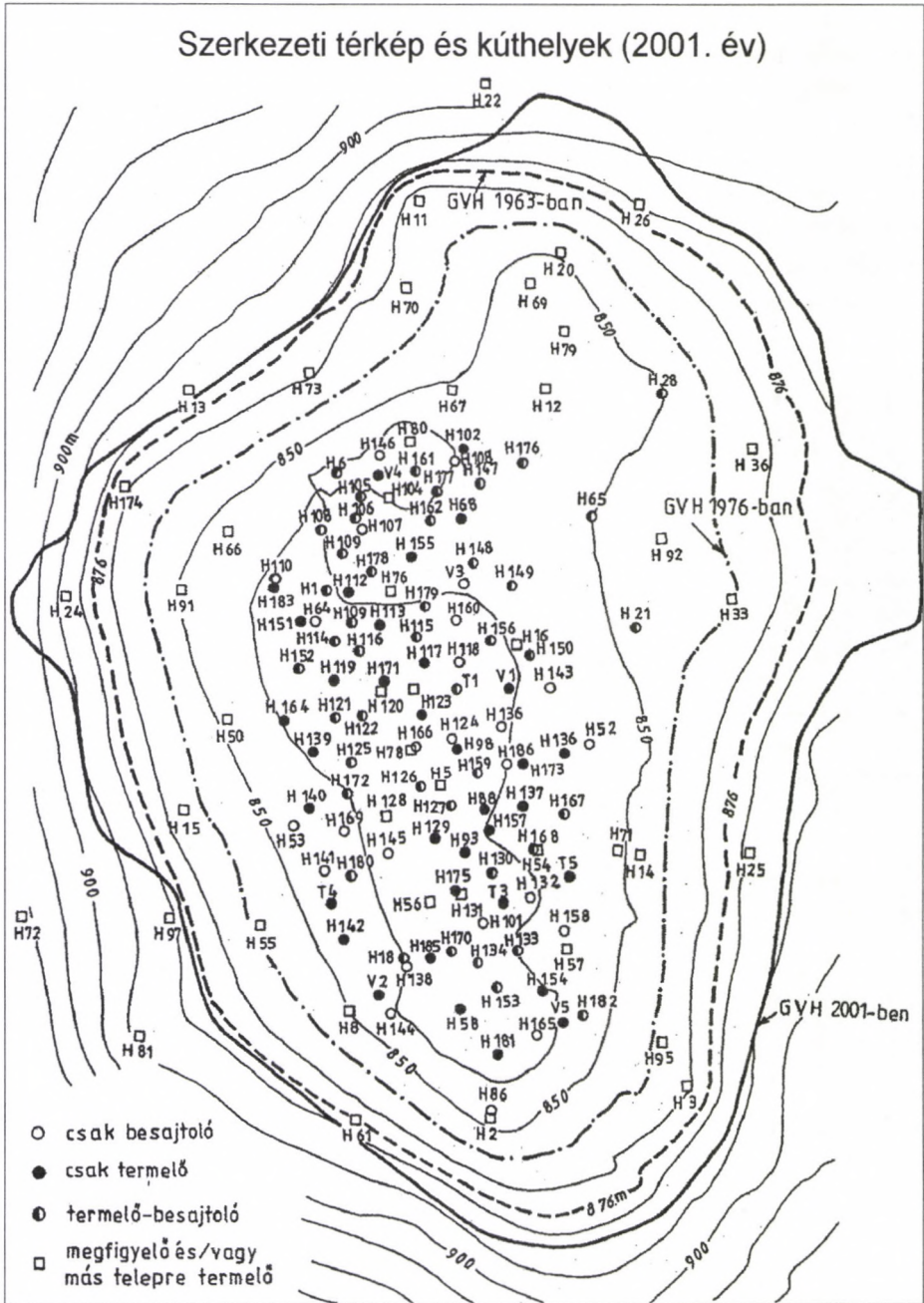
A műszaki-gazdasági értékelés az ún. „komplex” modellen alapult, amelyet Pápay J. (1969–70) dolgozott ki (Gundel I. készítette el a számítógépi programot). A komplex modellben az aquifer, a telep, a kúthálózat, a termelő-besajtoló rendszer és a kompresszortelep egy integrált rendszert képezett. A komplex modellben a telepet anyagmérleg-egyenlet segítségével vették figyelembe. Az anyagmérleg-egyenlettel történő modellezés egy példáját a 12. ábra szemlélteti.



12. ábra

Az ütemekhez tartozó aktív gáz mennyisége:

Ütem	Aktív gáz
$10^6 \text{ m}^3/\text{nap}$	$10^6 \text{ m}^3$
2	300
4	600
8	1200



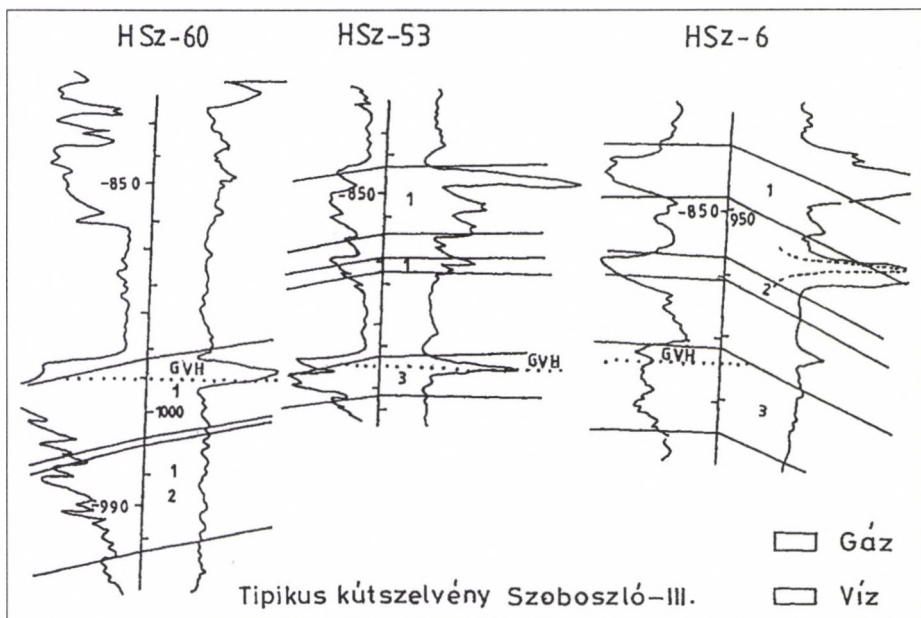
13. ábra

Ha az aktív gáz mennyisége nagy, akkor korábban a telepbe beáramlott víz egy része visszaáramlik az aquiferbe, a nagyobb átlagos telepnyomás miatt. Meg kell említeni azt, hogy a Szoboszló-III. telep termelésimúlt-elemzéssel meghatározott adatai a művelési múlt időtartalmának növekedésével változtak, pontosodtak.

A tároló kiválasztásának időpontjában (1971) meghatározott adatok eltérnek a 25–30 évvel később meghatározottaktól, mivel a telep működési mechanizmusának megismerése az adatok bővülésével pontosodott.

A korai elemzés (1971) időszakában meghatározott gázkészlet kisebbnek adódott a ma ismert értéknek tekintett készletnél, a víztestméretre ez fordítottan igaz. Ebből adódik az, hogy a kiválasztás időszakában az  $1200 \times 10^6 \text{ m}^3$  aktív gázmennyiségnél a számított tárolónyomás nagyobb, mint a kezdeti rétegyomás (12. ábra), holott a ma már ismert tárolási nyomások ezt nem igazolják. Ez az eltérés a kezdeti gázkészletek eltéréséből származik.

Miután a Szoboszló-III. telepet anyagmérlegszintű számításokkal a tárolóként kiválasztották, numerikus szimuláció segítségével pontosították a kúthelyeket. A kúthelyeket a tároló-heterogenitás, -interferencia figyelembevételével határozták meg, egy olyan numerikus modellel, amelyet K. H. Coats



14. ábra

(1969) javasolt, azzal a kiegészítéssel, hogy figyelembe vették a gáztermelés, -gyűjtés és -kompresszorozás szempontjait is.

A 13. ábra a szerkezeti térképet a réteg tetején, a 14. ábra a tipikus kútszelvényeket szemlélteti.

Amikor a Szoboszló-III. telepet a tárolás céljából kiválasztották, döntés született a termelés leállítására, azért, hogy a hosszú távú gáztárolás szempontjából a szükséges párnagáz a tárolóban visszamaradjon (15. ábra).

A tárolót fokozatosan fejlesztették, amelynek szakaszai:

Év	Aktív gáz $10^6 \text{ m}^3$	Kútszám
1979–1985	600–800	35
1985–1990	800–1000	45
1991–1999	1200–1500	80

A tároló fő paraméterei (1999. évi állapot):

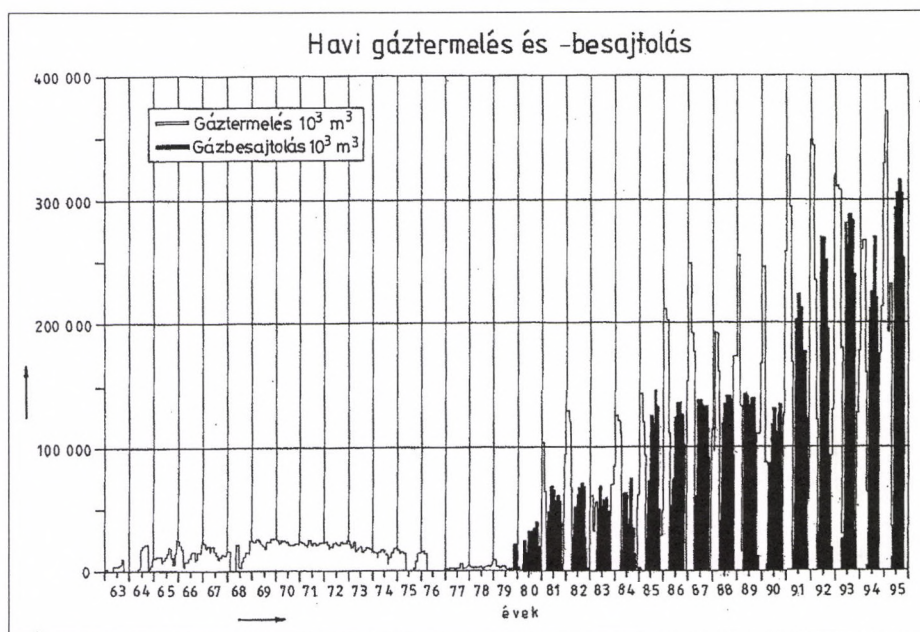
Földtani gázkészlet	$5,9 \times 10^9 \text{ m}^3$
Párnagáz	$2266 \times 10^6 \text{ m}^3$
Kútkiképzés	nyitott kút gravel pack-l.
Termelőcső-átmérő	41/2"
Gázbekötővezeték-átmérő	6"
Átlagos kúttávolság	150 m
Gázkezelés technológiája	dietilén-glikolos szárítás
Kompresszor kapacitása	$15 \times 10^3 \text{ kW}$

### 6.2.2. A hajdúszoboszlói gáztároló megfigyelése

A tároló üzemét állandóan megfigyelik és ellenőrzik. Megfigyelőkutak vannak az aquiferben, az átmeneti zónában, a gáztelített zónában és a tároló feletti gáztelepekben. Rendszeresen elemzik 3D és 3 fázisú modellel a tároló hidrodinamikai rendszerét, a kutak vizesedésének okát, a vízmozgás feltételeit, az átfertődés lehetőségét és a gázmérleget (pl. Adorjáné és társai munkája, 1996). A numerikus modell alapvető eszköze a tárolófejlesztésnek, az intenzifikálási lehetőségek felmérésének is.

A 15. ábra szemlélteti a termelés (besajtolás) alakulását az idő függvényében. Az ábra alapján megállapítható, hogy a tárolás időszakában a termelési ütem sokszorosa (15–20-szorosa) annak a termelésnek, amelyet a tárolás előtti időszakban alkalmaztak.





15. ábra

A 16. ábra szemlélteti a nyomásmérési adatokat. A nyomásértékek 45 bar intervallum-határ között változnak. Az anyagmérleg-egyenlet számításai és a megfigyelési eredmények azt igazolják, hogy az aktív gáz mennyiségének növekedésével a telepbe beáramlott víz egy része fokozatosan kiáramlik onnan (17. ábra).

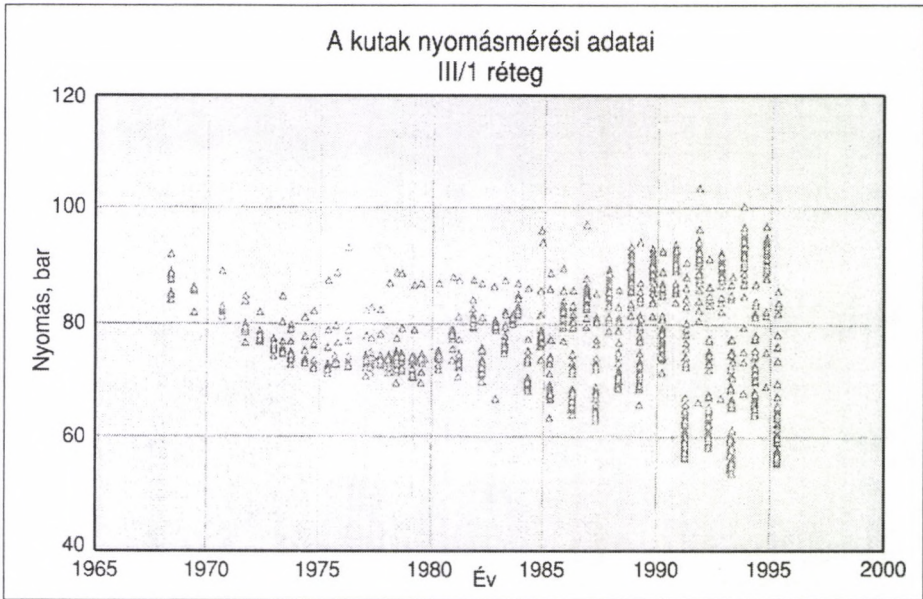
A kezdeti gáztelítettség-eloszlás (1963. január 1.) és a gáztelítettség a tárolás megkezdésének időpontjában (1979. december) a 18. és a 19. ábrákon látható. Megállapítható, hogy a vízbeáramlás miatt a gázzal telített tárolótér fogat csökkent, zsugorodott.

A 20. és 21. ábra az 1. modellrétegben mutatja az 1995. évben számított telítettség-eloszlást a termelési ciklus végén (április 30.) és a feltöltés végén (október 15.).

A számított nyomástérképet, amelyet mérésekkel ellenőriztek, a 22. és 23. ábra szemlélteti, ugyanabban az időpontban, mint a telítettség-térképek.

Az izobár térképek változnak a tárolási ciklusonként, amit ábrák is szemléltetnek.

A termelési ciklusban a gázbuborék nyomása kisebb, mint az aquiferé, besajtoláskor ennek a fordítottja igaz. A gáz relatívpermeabilitás-hiszterézise



16. ábra

és a mobilitási arányszám a termelési és besajtolási ciklusban történő változása miatt a „gázbuborék” lassan nő, kiterjed (13. és 21. ábrák).

Mivel az átmeneti zóna (kétfázisú) lassan szélesedik, ezért a tárolóban az átlagos nyomás kissé, de fokozatosan csökken.

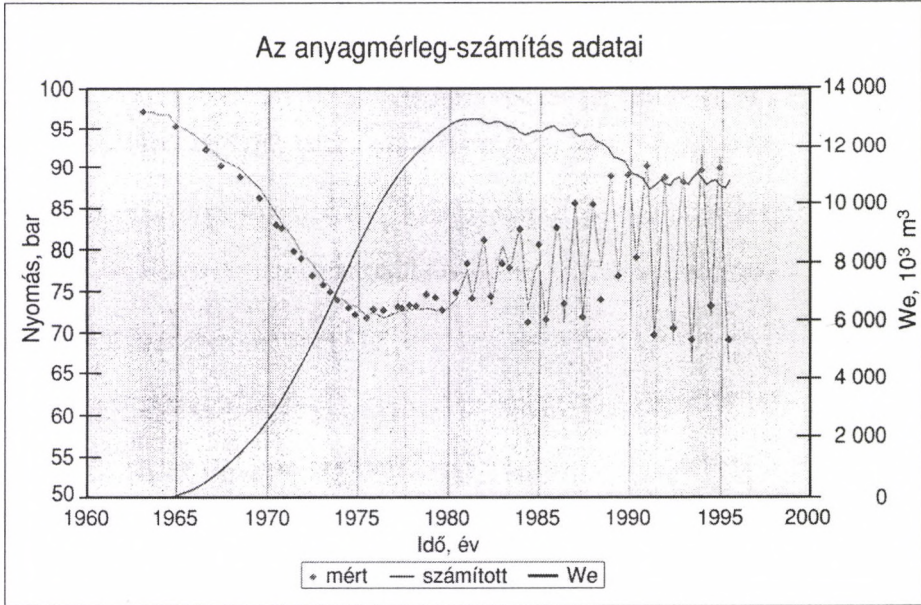
A 24–29. ábrák (a hajdúszoboszlói üzem szívességéből) a felszíni létesítményeket szemléltetik.

A felszíni technológiai létesítmények, rendszerek a 2. ábrával egyeznek meg, azzal a különbséggel, hogy a gázkezelés dietilén-glikolos (ellenáramú porlasztásos) gázzárítás.

### 6.2.3. A hajdúszoboszlói tárolófejlesztés legfontosabb mozzanatai

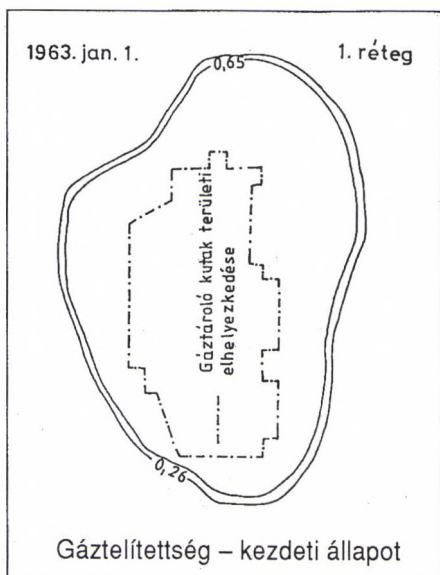
A hajdúszoboszlói tároló kifejlesztése és hatékony üzemeltetése a nagyszámú, különböző területeken dolgozó és együttműködő tudományos kutató, szakember munkájának az eredménye.

Áttekintve a hajdúszoboszlói gáztároló kifejlesztésének történetét, amit egyrészt a korszerű tudományos, műszaki elemzések, másrészt a gyakorlati tapasztalatok határoztak meg, a következőkben foglalható össze:

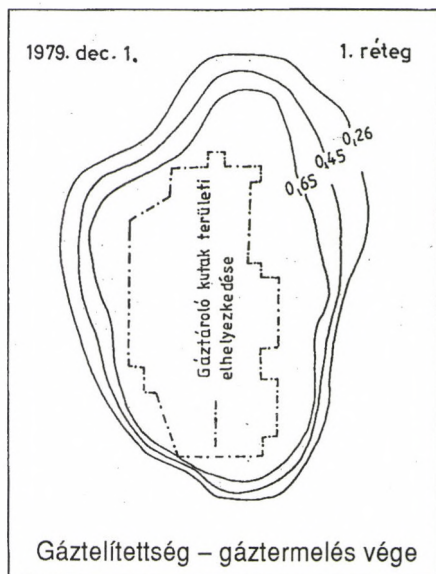


17. ábra

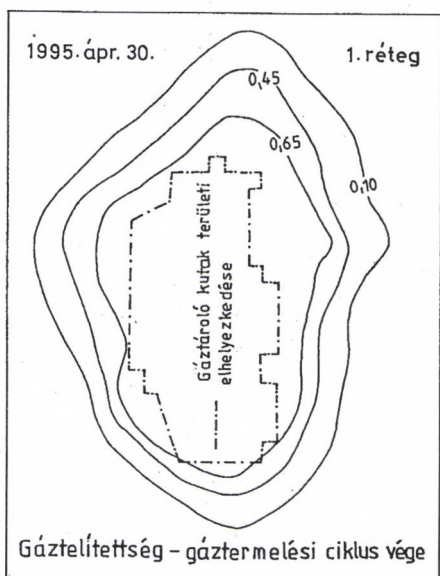
- a gáztárolás helyének a kijelölése a K-i irányból jövő gázimport és a hajdúszoboszlói gázmező adottságait tekintve;
- a mezőn belül a Szoboszló-III. telep kiválasztása, figyelembe véve a hosszú távú gáztárolás szempontjait műszaki és gazdasági elemzéssel;
- a víznyomásos Szoboszló-III. gáztelep termelésének leállítása azért, hogy a majdani tároláshoz szükséges párnagáz ne kerüljön kitermelésre;
- korszerű kútszerkezet kialakítása (nyitott kútszelvény gravel pack-s szűrővel);
- az optimális kúthelyek kijelölése a telep heterogenitásának és hidrodinamikai rendszerének figyelembevételével;
- lépcsőzetes tárolóbővítés;
- a tároló megfigyelőrendszerének fokozatos kiépítése;
- a tároló intenzifikálása (termelőcsőcserek, a bekötővezetékek kapacitásának növelése, horizontális kutak, a kompresszorok kétfunkciós alkalmazása);
- a kútfunkciók részleges szétválasztása (termelő-besajtoló, csak termelő, csak besajtoló) tárolóvédelem szempontjából;
- rendszeres tároló-karbantartás (rezervoármérnöki elemzés, a kútállapotok felülvizsgálata, a termelőberendezések állagának megőrzése stb.).



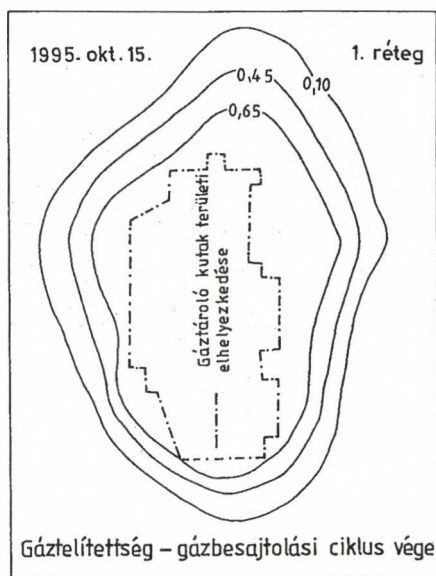
18. ábra



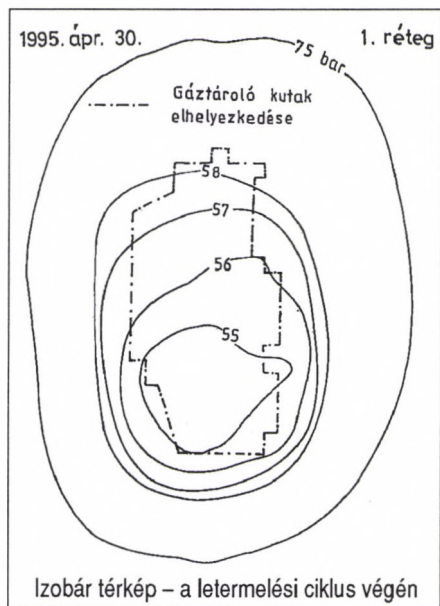
19. ábra



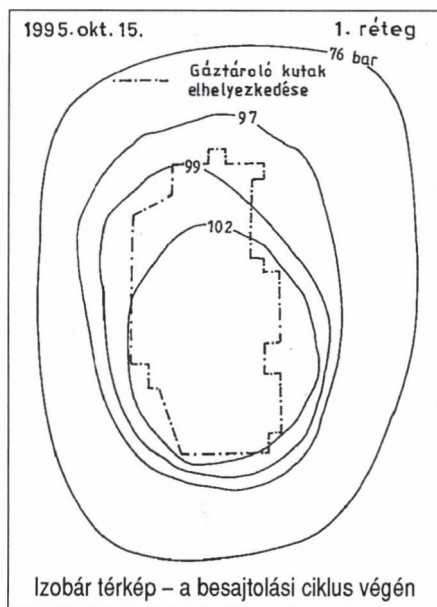
20. ábra



21. ábra



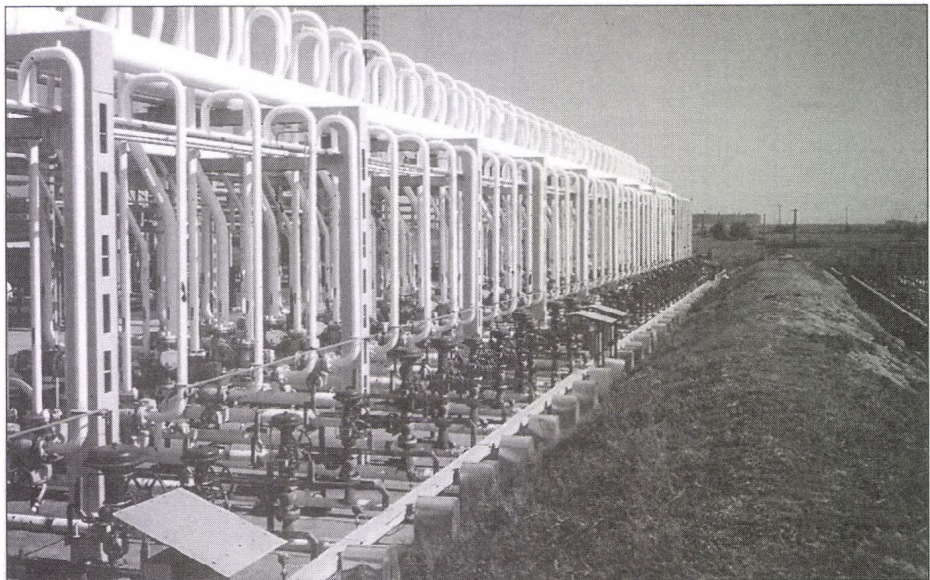
22. ábra



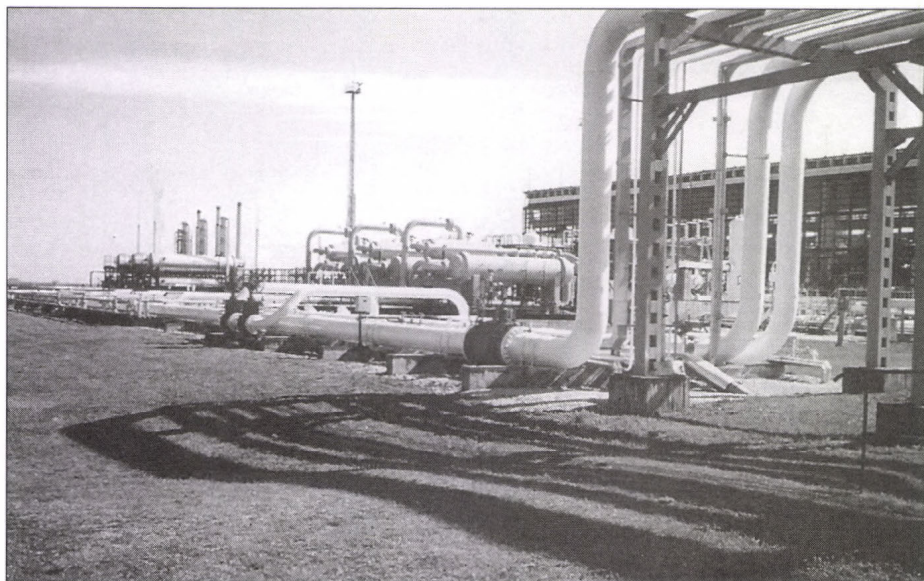
23. ábra



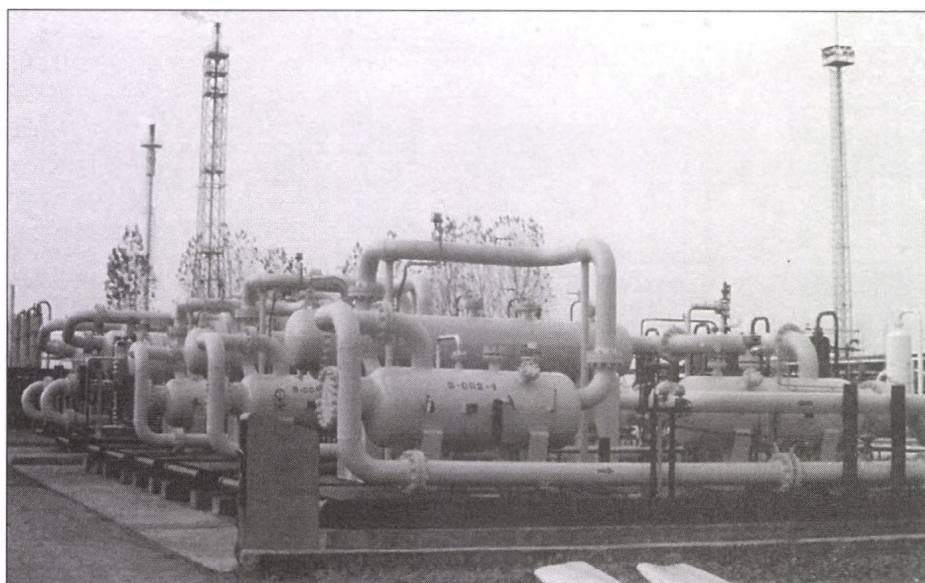
24. ábra. Tipikus gáztermelő, illetve -besajtoló kút



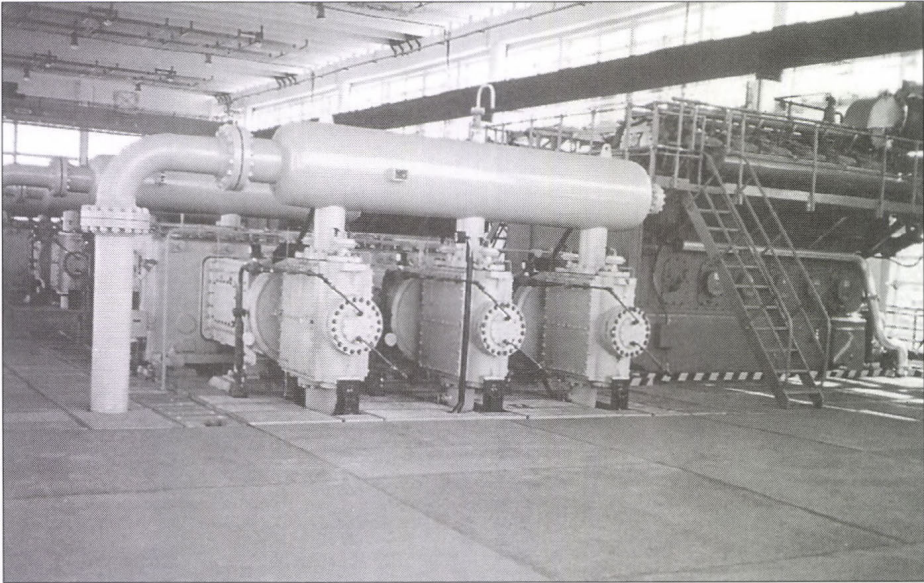
25. ábra. Gázgyűjtő, illetve -elosztó központ



26. ábra. Gáztechnológia látképe. Középen: glikolos gázsűrítő egység. Háttérben balra: glikolregenerálók. Háttérben jobbra: kompresszorház



27. ábra. Dietilén-glikolos gázkezelés ellenáramú porlasztással



28. ábra. Dugattyús gázkompresszorok gázmotormeghajtással



29. ábra. Gázmérő, illetve -kiadó állomás



## A tanulmányban alkalmazott jelölések

$A$	– rétegparaméter
$B, B', B_1, B_2$	– réteg- és réteg-termelőcső-gázvezetékre vonatkozó paraméter
$B$	– vízbeáramlási állandó
$B_g$	– a gáz teleptérfogati tényezője
$C, C', C_1, C_2$	– a réteg és a réteg-termelőcső-gázvezeték kapacitásának állandója, illetve kompresszorkonstans
$c$	– a közet és a tapadóvíz effektív kompresszibilitási tényezője a gázos pórustérfogatra vonatkoztatva
$c_{p1}, c_{p2}$	– a gáz-gáz hőcserélő magas és alacsony nyomású oldalán a gáz fajhője
$D$	– termelőcső-konstans
$d$	– csővezeték-átmérő
$E$	– gázvezeték-állandó
$F$	– a gáz-gáz hőcserélő felülete, illetve gázkútállandó
$K$	– a gáz-gáz hőcserélő hőátbocsátási tényezője
$L$	– a gázvezeték hossza
$m_1, m_2$	– a gáz-gáz hőcserélő magas és alacsony nyomású oldalán áramló gáz mennyisége
$N$	– a kompresszor teljesítménye
$n, n', n_1, n_2$	– a réteg és a réteg-termelőcső-gázvezeték turbulenciatényezője
$p, p_c$	– rétegnyomás
$p_o$	– referencianyomás
$p_c$	– a gáz nyomása a gyűjtőközpontban
$p_f$	– magas nyomású gázvezeték nyomása (távvezeték)
$p_{wh}$	– kúttalpanyomás
$p_{wh}$	– kútfejnyomás
$p_1$	– kompresszor-szívónyomás, besajtoláskor $p_1=p_f$ , termeléskor $p_1=p_c$
$p_2$	– a kompresszor nyomóoldali nyomása, besajtoláskor $p_2=p_c$ , termeléskor $p_2=p_f$
$Q$	– termelési ütem, a telepben lévő gáz mennyisége
$q_p$	– a gáztárolóra vonatkozó termelési ütem
$q_i$	– a gáztárolóra vonatkozó besajtolási ütem
$Q_c$	– a párnagáz mennyisége
$Q_i$	– az aktív gáz mennyisége
$Q(t_D)$	– a dimenzió nélküli vízbeáramlás
$T$	– réteghőmérséklet
$T_o$	– referencia-hőmérséklet
$T_1$	– gázhőmérséklet a kompresszor belépésénél
$t$	– idő
$t_1$	– a gázhőmérséklet a gyűjtőpontban, illetve a gáz-gáz hőcserélő belépésénél

$t_3$	– a gáz harmatpontja, illetve az alacsony hőmérsékletű szeparátor hőmérséklete
$z$	– kompresszibilitási tényező rétegekörülményeknél
$z_0$	– kompresszibilitási tényező referenciaállapotnál
$z_1$	– kompresszibilitási tényező a kompresszor belépésénél lévő paramétereknél
$V$	– a gáztároló gázos pórustérfogata
$V^*$	– a tároló pillanatnyi gázos pórustérfogata
$V_0$	– a tároló gázos pórustérfogata referenciaállapotnál
$W_e$	– a telepbe beáramlott víz mennyisége telepnyomáson és -hőmérsékleten
$W_p$	– kumulatív víztermelés telepkörülmények között
$\Delta p$	– nyomáscsökkenés, depresszió
$\Delta t$	– hűtőegységgel létrehozandó hőmérséklet-csökkenés
$\mu$	– expansziós szelepnél a Joule–Thomson-koefficiens
$\nu$	– a kompresszor hatásfoka
$\chi$	– a gáz adiabatikus tényezője

## Függelék

A tárolandó gáz mennyisége olyan nagy, hogy csak a földtani körülmények biztosította térfogatban történhet a gáz gazdaságos tárolása. Ez a térfogat egy olyan kőzettestben található, amelynek porozitása 1–30%, és nagy kiterjedésben, térfogatban (a már részletezett feltételek mellett) található meg.

Ezt a földtani szerkezetet fel kell kutatni, fúrással kutakat kell telepíteni, a kutakat megfelelően ki kell képezni, a gázt ki kell termelni (besajtolni), elő kell készíteni, és a fogyasztóhoz el kell juttatni.

Pápay J. (1972) a gázteleptől az elosztó rendszerig terjedő rendszer komplex vizsgálata műszaki-gazdasági jelentőségét példákon keresztül igazolja, és rámutat arra, hogy a „közös célnak megfelelően több, egy-egy szakterületen dolgozó szakember együttes munkája hozhat csak megfelelő pontosságú eredményt”. Ez lényegében nem más, mint a „szinergia és a reservoir management” alapelveinek megfogalmazása kőolaj-, földgáz-, illetve föld alatti gáztárolórendszerek esetén.

A föld alatti gáztároló létesítéséhez és üzemeltetéséhez a következő szakterületek tevékenységére van szükség: geofizika, geológia, kútszelvényezés (karotázs), fúrás, geokémia, rezervoármérnöki tudományok, termelés technológia, vegyipari technológia, távvezetési gázszállítás, meteorológia, közgazdaságtan.

*Geofizika:* feladata a földtani szerkezet megtalálása, a morfológiai viszonyok tisztázása általában szeizmikus módszerekkel,

*Geológia:* feladata az ún. statikus modell megalkotása: a tároló nagysága, kiterjedése, készletek meghatározása, paraméter-elosztás (porozitás, permeabilitás, effektív vastagság, betelepülések) stb. kiterképezése.

*Fúrás:* feladata olyan kutak telepítése, építése, illetve kiképzése, amelyek jó hatásfokkal (kis energiafelhasználással) teszik lehetővé a tárolószervezetbe történő besajtolást, illetve az onnan való kitermelést.

*Rezervoármérnöki szakterület:* feladata a dinamikus tárolómodell megalkotása, a gáztároló tervezése, a tároló felülvizsgálata, a teljesítményének fenntartása és intenzifikálása. A dinamikus modell annyival több, mint a statikus, hogy a tárolószervezet felépítésénél, annak pontosításánál figyelembe veszi a tárolóban és azzal hidrodinamikai kapcsolatban lévő aquiferben a fluidumok szűrődésének törvényszerűségeit a tárolóviselkedés (termelésimúlt-elemzés) alapján.

*Kitermeléstechnológia:* feladata a gáztermelés, -besajtolás, -gyűjtés, illetve az -elosztás irányítása, ellenőrzése a hatékony üzemeltetés szempontjából.

*Geokémia:* feladata alapvetően a tároló hermetikusságának ellenőrzése geokémiai eszközökkel, a termelt, illetve besajtolt gázok összetételének meghatározása stb.

*Vegyipari technológia:* feladata a gázkezelés feltételeinek a biztosítása a távvezetési gázszállítás megkövetelte igényeknek megfelelően.

*Távvezetési gázszállítás:* feladata a gáz fogyasztókhöz (télen), illetve a gáztárolóba (nyáron) való biztonságos, ellenőrzött eljuttatása.

*Meteorológia:* feladata a várható időjárási viszonyok (hőmérséklet) hosszú távú, illetve rövid távú (akár napi) előrejelzése a tárolási volumen meghatározása és a tároló üzemeltetése szempontjából.

*Közgazdaságtan:* feladata a létesítendő tároló profittermelő képességének felmérése, a tárolás gazdasági minősítése.

Ezen szakterületek kvantitatív integrálásának eszköze a matematikai, illetve a numerikus modellezés.

A 2. ábra szerinti rendszer a következő algoritmusrendszerrel írható le:

Földgáztároló komplexum algoritmus (I):

telepre: az  $x$  koordináta mentén (az  $y$  és  $z$  irányokra hasonlóan):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{k_x k_{rv} b_{bv}}{\mu_w} \left( \frac{\partial p_w}{\partial x} - \rho_w \frac{\partial z}{\partial x} \right) \right] - Q_{vw} = \frac{\partial (\Phi b_w S_w)}{\partial t}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{k_x k_{ro} b_o}{\mu_o} \left( \frac{\partial p_o}{\partial x} - \rho_o \frac{\partial z}{\partial x} \right) \right] - Q_w = \frac{\partial(\Phi b_o S_o)}{\partial t}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ k_x \left[ \frac{k_{ro} b_o R_s}{\mu_o} \left( \frac{\partial p_o}{\partial x} - \rho_o \frac{\partial z}{\partial x} \right) + \frac{k_{rg} b_g}{\mu_g} \left( \frac{\partial p_g}{\partial x} - \rho_g \frac{\partial z}{\partial x} \right) \right] \right\} - Q_{vg} =$$

$$= \frac{\partial[\Phi(b_o R_s S_o + b_g S_g)]}{\partial t}$$

Amennyiben a tároló kettős porozitású, akkor az egyenlet kiegészül még egy forrással, illetve nyelővel, amely a mátrixot és/vagy a kavernát reprezentálja (Pápay J.–Gundel I.: *Kőolaj és Földgáz*, 1981. dec., 1982. jan.)

Földgáztároló komplexum algoritmus (II):

kúttalpra vonatkozó egyenletrendszer:

$$Q_o = \frac{\frac{k_{ro}}{\mu_o}}{\frac{k_{ro}}{\mu_o} + \frac{k_{rw}}{\mu_w} + \frac{k_{rg}}{\mu_g}} \cdot Q \Big|_i ; Q_g = \frac{\frac{k_{rg}}{\mu_g}}{\frac{k_{ro}}{\mu_o} + \frac{k_{rw}}{\mu_w} + \frac{k_{rg}}{\mu_g}} \cdot Q \Big|_i ; Q_w = Q - Q_o - Q_g \Big|_i$$

Dupuit-összefüggés:

$$Q = \frac{2\pi h k k_r (p_e - p_{wb})}{\mu \left( \ln \frac{r_e}{r_w} + S \right)} \Big|_{i(w,o,g)}$$

Ha az áramlás a kúttalpon egyfázisú, akkor P. Forchheimer vagy akár E. L. Rawlings és M. A. Schelherdt összefüggése alkalmazható.

Termelőcsőre D. L. Katz (5. egyenlet), bekötővezetékre és távvezetékre T. R. Weitmouth (6. egyenlet), a kompresszorra a D. L. Katz vagy Tek M. R. (13. és 14. egyenlet), a mesterséges hűtőegységre a Pápay J.-féle (12. egyenlet) összefüggést alkalmazzuk.

Földgáztároló komplexum algoritmus (III):

energiaegyenlet:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( zQ + u + \frac{w^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial h} \left[ \rho w \left( zQ + u + \frac{w^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial h} [\rho w (p\nu)] = \frac{\partial Q_t}{\partial h} + \frac{\partial L_t}{\partial \nu} \Big|_i$$

Az energiaegyenlet segítségével számolható az áramló fluidum (esetünkben a földgáz) hőmérséklete. Az energiaegyenlet Pápay J. (1984.) különböző fluidumrendszerekre, kútkiképzésekre és csővezetékrendszerre oldotta meg (*A szénhidrogénbányászat céljából fúrt kutak hőmérsékletviszonyai meghatározásának általános elmélete*. MTA, 1983. „A tudományok doktora” fokozat – disszertáció).

Ha a tároló homogén, és a gázáramlás izoterm, akkor az I., II., és III. egyenletrendszer 1–10. egyenletrendszerrel közelíthető.

Az I–III. egyenletekben a paraméterek jelentései a következők:

$b$	– teleptérfogati tényező reciproka
$h$	– a rétegvastagság, a csőszakasz hossza
$i$	– a kútra vonatkozó index
$k_x$	– $x$ irányú abszolút átteresztőképesség
$k_r$	– relatív átteresztőképesség
$L_i$	– a rendszeren végzett vagy a rendszer által végzett munka
$p$	– nyomás
$r_o, r_w$	– tápterület, illetve kútsugár
$R_o$	– olajban oldott fajlagos gáztartalom
$S$	– telítettség, szkintényező
$t$	– idő
$u$	– belső energia
$v$	– fajtérfogat
$w$	– áramlási sebesség
$w, o, g$	– a víz-, olaj-, gázfázisra vonatkozó index
$x, y, z$	– helykoordináták
$Q$	– rétegtérfogatú összes termelés (besajtolás)
$Q_v$	– egységnyi kőzettérfogatra vonatkozó termelés (besajtolás)
$Q_w, Q_o, Q_g$	– víz-, olaj- és gáztermelés (besajtolás)
$Q_i$	– az áramló rendszerrel közölt vagy attól elvont hő mennyisége
$\phi$	– porozitás
$\mu$	– viszkozitás
$\rho$	– sűrűség.

## Irodalom

1. Adorján K.né, Csorba M., Hevesi S.né, Gundel I., Pápay J.: Földgáztelepek és -tárolók hazai tervezési módszerei. *Kőolaj és Földgáz*, 1977. okt., 314–319.
2. Adorján K.né, Bóródi T., Gundel I., Király A., Pápay J., Szabó I.: *A hajdúszoboszlói föld alatti gáztároló művelésének rezervoármérnöki felülvizsgálata*. 1996. szeptember 25–26. Tihany, OMBKE 23. Vándorgyűlés.
3. Bérczi I., Pápay, J.: *A New Challenge in Reservoir Management: Design and Operation of Underground Gas Facilities*. 1999. June 7–11. Dubrovnik, Petroleum Reservoir Management.
4. Coats, K. H.: *An Approach to Locating New Wells in Heterogeneous, Gas Producing Fields*. J. P. T., 1969. May., 549–558.
5. Forchheimer, P.: Wasserbewegung durch Boden. *Zeitz ver Deutch Ing.*, 45, 1901, 1782–1788.
6. Katz, D. L., Cornell, D., Kobayashi, R., Poettmann, R., Poettmann, F. H., Vary, J. A., Elenbas, J. R., Weinaug, C. F.: *Handbook of Natural Gas Engineering*. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1959.
7. Katz, D. L., Vary, J. A., Elenbas, J. R.: Design of Gas Storage Fields. *Trans. Aime.*, 1959, Vol. 216, 44–48.
8. Katz, D. L., Coats, K. H.: *Underground Storage of Fluids*. Ulrichs Books Inc., Ann Arbor, Michigan, 1968.
9. Katz, D. L., Lee, R. L.: *Natural Gas Engineering Production and Storage*. Mc Graw-Hill Publishing Company, New York, 1990.
10. Pápay J.: A távvezetéki szállításra kerülő gáz előkészítése az előkészítés nyomásának és a környezet hőmérsékletváltozásának függvényében. *OGIL, Műszaki Tudományos Közlemények*, 1967.
11. Pápay J.: Az expanziós szeparálás optimális paramétereinek meghatározása. Műszaki doktori értekezés, Miskolc, 1967. márc. 28.
12. Pápay J.: Az expanziós gázelőkészítőegység fő méreteinek meghatározása. *Kőolaj és Földgáz*, 1968. máj., 129–136.
13. Pápay, J.: *How does cushion gas determine technological, technical, conomical parameters of underground gas storage*. Milano, 1970. June. Scuola Enrico Mattei (Final work for Post Graduate Diploma).
14. Pápay, J.: *Technological, technical, economical coherence between gas treatment (gasoline plant) station and gas pipeline*. Milano, 1970. June. Scuola Enrico Mattei (Final work for Post Graduate Diploma).
15. Pápay J.: Párnagáz szerepe a föld alatti gáztárolásban. *OGIL Műszaki Tudományos Közlemények*, 1970, 83–190.
16. Pápay J.: Gáztelep, -kút, -vezeték teljesítményegyenlete. *Kőolaj és Földgáz*, 1971. aug., 231–235.
17. Pápay J., Gundel I.: Hajdúszoboszlói gáztárolás lehetőségének vizsgálata. *Kőolaj- és Földgáz-bányászati Ipari Kutató Laboratórium Műszaki Tudományos Közleményei*, 1971, 205–214.
18. Pápay J.: A gázteleptől a távvezeték végpontjáig terjedő rendszer komplex vizsgálatának jelentősége. *Kőolaj és Földgáz*, 1972. ápr., 106–114.
19. Pápay J.: *Gáztelep és gázelosztóhálózat vertikális kapcsolata*. Kandidátusi értekezés, MTA, Budapest, 1974.

20. Pápay J., Surányi A.: Peremi víznyomásos földgáztelepek, objektumok és gáztárolók numerikus modellezésének módszere. *Kőolaj és Földgáz*, 1976. júl., 208–212.
21. Pápay J., Gundel I.: Több objektumból álló gázmező számítógépes komplex modellezése. *Kőolaj- és Földgázbányászati Ipari Kutató Laboratórium Műszaki Tudományos Közleményei*, 1976, 81–94.
22. Pápay J., Hevesi S.né: A gázzal való vízkiszorítás folyamatának elemzése. *Kőolaj és Földgáz*, 1979. júl., 201–206.
23. Pápay J., Gundel I.: Vegyes porozitású tárolók numerikus modellezése I–II. rész. *Kőolaj és Földgáz*, 1981. dec., 372–376., 1982. jan., 15–25.
24. Pápay J.: *Földgáztermelés és föld alatti gáztárolás*. Monográfia (Dr. Vida Miklós szerkesztésében). Gáztechnikai kézikönyv. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1984–91.
25. Pápay J., Adorján K.né, Gundel I.: A hajdúszoboszlói föld alatti gáztároló bővítése. *Kőolaj és Földgáz*, 1985. márc., 65–74.
26. Pápay J., Miklós T., Szittár A.: Földgáztárolóink és üzemeltetési tapasztalatai. *Kőolaj és Földgáz*, 1985. nov., 321–328.
27. Pápay J., Adorján K.né., Gundel I.: A hajdúszoboszlói gáztároló párnagázának részleges lecserélése CO tartalmú földgázzal. *Kőolaj és Földgáz*, 1986. máj., 129–139.
28. Pápay J., Farkas É., Gundel I.: Vízszintes kutak föld alatti gáztároló intenzifikálására. *Kőolaj és Földgáz*, 1995. júl., 190–198.
29. Pápay, J.: *Underground Gas Storage*. 1996 MOL Plc. Advanced Downstream Technology. Prepared for International Business Unit. Published by MOL–Plc.
30. Pápay, J.: Engineering Aspects of Underground Gas Storage. *Kőolaj és Földgáz*, 1996. okt., 285–291.
31. Rawlings, E. L., Schelhardt, M. A.: *Backpressure Data on Natural Gas Wells and Their Application to Production Practices*. Monograf 7, U. S., Bureau of Mines, 1936.
32. Tek, M. R.: *Underground Storage of Natural Gas*. Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1987.
33. Weimouth, T. R.: Problems in Natural Gas Engineering. *Trans. A. S. M. E.*, 1912, Vol. 34, 185.