

A CO₂ föld alatti tárolása „sós vizes” víztartó rétegekben történő megvalósulásának lehetőségei Magyarországon

SZAMOSFALVI ÁGNES^{1@}, FALUS GYÖRGY¹, JUHÁSZ GYÖRGYI²

¹Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet, 1145 Budapest, Columbus u. 17–23.

²Magyar Olaj- és Gázipari Nyrt., 1117 Budapest, Október huszonharmadika u. 18.

@E-mail: szagi@elgi.hu

Az üvegházhatású gázok és ezen belül is a szén-dioxid-kibocsátás növekedése jelentős klimatikus problémákat vet fel, melyek megoldására rövid idő alatt megfelelő alternatívákat kell találni. Az üvegházhatású gázok légkörbe kerülésének lelassítására és megakadályozására az egyik megoldás lehet a szén-dioxid-leválasztás és föld alatti elhelyezése (CCS), amely azért olyan különleges, mivel jelenleg egyedül ez a technológia képes megfelelően rövid idő alatt komoly kibocsátáscsökkenést elérni úgy, hogy az energiatermelés szerkezetét nem kell drasztikusan megváltoztatni/átalakítani.

A szén-dioxid-elhelyezés szempontjából a letermelt szénhidrogén-tárolók csak korlátozott tárolókapacitással rendelkeznek, míg lényegesen elterjedtebb potenciális tárolóobjektumokat képviselnek az ún. „sós vizes” rezervoárok, vagyis jelentősebb vastagságú, rétegvíz-tároló, hidrodinamikailag záródó földtani képződmények.

A „sós vizes” rezervoárokban történő tárolás alapvető feltételeit figyelembe véve megvizsgáltuk a potenciálisan alkalmas magyarországi kőzetkifejlődéseket. Előzetes vizsgálataink alapján számos, a tárolás alapvető kritériumainak eleget tevő földtani képződmény található hazánkban. Ezek közül a hosszú távú, biztonságos tárolás szempontjából legalkalmasabbnak tűnő képződménycsoporton, a pannóniai s.l. korú Szolnoki Formáción keresztül mutatjuk be a szén-dioxid-tárolási kapacitás számításának lépéseit és azok előzetes eredményeit 3 tárolási potenciál számítási módszer alkalmazásával.

Szamosfalvi, Á., Falus, Gy., Juhász, Gy.: The potential options of storing CO₂ in saline reservoirs in Hungary

The increasing emission of greenhouse gases especially carbon dioxide imposes a significant climatic issue. Adequate alternative solutions have to be found on a limited time frame in order to answer the arising problems. One of the solutions that may effectively reduce and hinder greenhouse gas emissions is carbon dioxide capture and geological sequestration. This complex technology has the advantage of producing radical emission reductions in adequately short time, without the necessity of drastically restructuring energy production.

Depleted hydrocarbon reservoirs, although available, represent only limited storage potential. Whereas, thick groundwater storing hydrodynamically closed geological formations, namely saline reservoirs, as potential storage objects, are far more abundant and

We have studied the potential rock formations considering the basic criteria for storing carbon dioxide in saline reservoirs. Our preliminary results show that several geological formations exist in Hungary which fulfil the discussed requirements. Among these formations we have selected the Szolnok Formation of s.l. Pannonian age, being one of the most appropriate formations for long term safety, to demonstrate the steps of 3 different approaches to estimate storage capacity.

Beérkezett: 2011. augusztus 25.; *elfogadva:* 2011. szeptember 12.

Bevezetés

Magyarországon és a világban az ipari tevékenység következtében kibocsátott szén-dioxid jelentős mértékben hozzájárul bolygónk gyors ütemű klimatikus változásához. A sarki jég olvadása, a melegedő tengervíz hőtágulása miatti tengerszint-emelkedés, a nagy erejű ciklonok egyre szapo-

rodó száma a kezdődő klímaváltozás intő jelei, amely jelenségek egyik legfőbb kiváltó okaként az üvegházhatású gázok és ezen belül is a szén-dioxid-kibocsátás növekedését és a globális hőmérséklet markáns emelkedését jelölik meg.

E folyamatok lelassításához és megállításához szükséges a CO₂ légkörbe történő kibocsátásának mérséklése. Világszinten a szén-dioxid-emisszió több mint 40%-a az energia

termeléséhez kapcsolódik. A helyzet súlyosságát fokozza a globálisan folyamatosan növekvő energiaigény, amely előrejelzések szerint 2030-ig akár 50%-kal is emelkedhet a jelenlegi szinthez képest.

A szén-dioxid-emisszió csökkentésére több lehetőség kínálkozik, például az energiefelhasználás hatékonyságának növelése, atomenergia, vízi-, illetve alternatív energiatermelés, továbbá a szén-dioxid leválasztása és föld alatti elhelyezése (Carbon Capture and Storage – CCS).

A Nemzetközi Energiaügynökség (IEA), valamint az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC) vizsgálatai (IPCC, 2007; IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 2008) alapján a jelenleg alkalmazható emissziócsökkentési eljárások közül, egyedül a szén-dioxid föld alatti tárolása képes megfelelően rövid idő alatt, az energiatermelés szerkezetének drasztikus átalakítása nélkül komoly kibocsátáscsökkenést elérni.

A szén-dioxid föld alatti elhelyezése – főként az Európai Unióban – az egyre szélesebb körben elfogadott emissziócsökkentési eljárás. Ezt mi sem jelzi jobban, mint az a tény, hogy 2008. január 23-án az Európai Unió megfogalmazta a „Klíma- és Energiacsomagot”, azaz a szén-dioxid-kibocsátás mérséklésével kapcsolatos terveit. Ebben a tervezetben jelentős szerepet kap – többek között – a CCS technológia támogatása is. 2009 áprilisában az Európai Tanács és az Európai Parlament is jóváhagyta a tervezetet, és elfogadta a „Csomagot” alkotó uniós direktívákat, amelyeket a tagállamoknak – így Magyarországnak is – 2011 júniusáig kötelező saját jogrendszerükbe integrálni. Az elfogadástól számítva a CO₂ föld alatti tárolása elismert üvegházgáz-kibocsátáscsökkentési eljárás lett, és mint ilyen, 2013-tól bekapcsolódik a kvótakereskedelmi rendszerbe.

A szén-dioxid-elhelyezés szempontjából felmerülő objektumok közül a letermelt szénhidrogén-tárolók – bár a tárolási projektek korai szakaszában vélhetően jelentős szerepet játszhatnak – csak korlátozott tárolókapacitással rendelkeznek. Ráadásul ezek az objektumok gyakran a kibocsátóktól távol esnek. A letermelt szénhidrogén-tárolók esetében további problémát jelenthet a nagyszámú kút megléte is, melyek sérülése esetén a gázok a felszínre migrálhatnak, ezzel a CO₂-tárolás szempontjából alkalmatlanná téve a mezőt.

A letermelt szénhidrogén-előfordulásoknál lényegesen elterjedtebb potenciális tárolóobjektumokat képviselnek az ún. „sós vizet” rezeruoárok, amelyek általában jelentősebb vastagságú, hidrodinamikailag záródó, rétegvíz-tároló földtani képződmények, illetőleg képződménycsoportok. A „sós vizet” rezeruoárokat porózus és átteresztő rezeruoárközetekként definiálhatjuk, amelyek sós, illetve félsós vizet tartalmaznak a pórusaikban. Ezek a kőzetek a szokásos ivóvíztárolóknál lényegesen mélyebben helyezkednek el, és vizük nagy sótartalma és a nagy mélység miatt gazdaságosan nem hasznosítható. Az Amerikai Egyesült Államok Környezetvédelmi Hivatala 10 000 mg/l oldott iontartalomnál húzza meg azt a határt, amely felett a rezeruoár vize már nem minősül ivóvíznek. Az Európai Unió országaiban, így Magyarországon sem határozták meg eddig ezt az értéket.

Tekintettel arra, hogy Magyarországon azok a képződmények, amelyek kielégítik e tárolótípus feltételeit, s kellően feltártak, többnyire a Pannon-medence képződményei, azon belül is jó részük a pannóniai s.l. képződmények közé tartozik, inkább csökkent sós vizet rezeruoárokként kellene említenünk, ezért a nemzetközileg elfogadott kifejezést mindenütt idézőjelben használjuk a továbbiakban.

Fontos figyelembe venni azt is, hogy átfedések lehetnek a „sós vizet” tárolók és a potenciális termálvíz-rezeruoárok között. Ezen átfedések elkerülésére részletes földtani kutatás szükséges.

Mivel a mélyen fekvő sós vizet formációk rendkívül elterjedtek a világon szinte mindenhol, és általában hidrodinamikailag nem aktívak, így potenciális szén-dioxid-tárolóként vehetők figyelembe, amennyiben a kiszemelt földtani egységeknek:

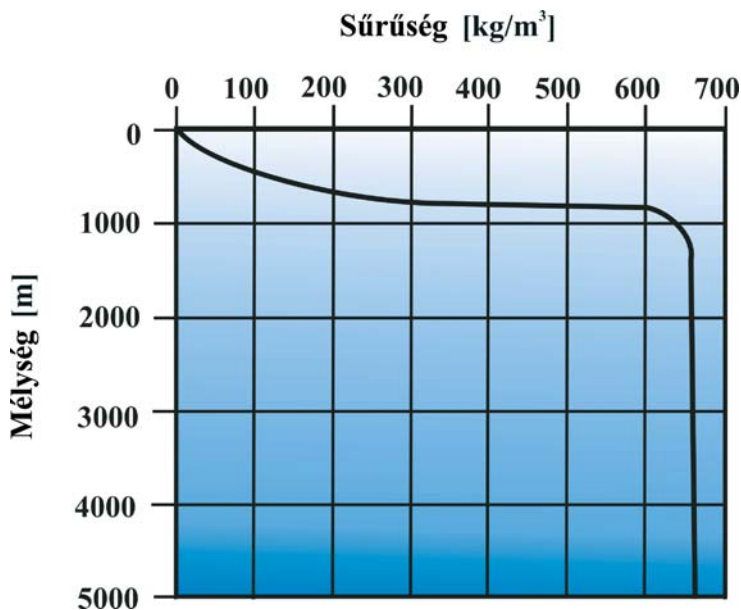
- elég nagy a porozitása, valamint a kiterjedése ahhoz, hogy elegendő mennyiségű szén-dioxidot tároljon,
- kellően elszeparált az ivóvízként és termálvízként használható vízbázistól,
- valamint jól záró fedője van, amely megakadályozza a szén-dioxid felfelé való szivárgását.

Az injektált szén-dioxid egy része oldódik a vízben, valamint reakcióba léphet a kőzettel, és egy része karbonát ásványként kicsapódhat. Ez az ásványképződés tovább csökkentheti a fedő porozitását, ezzel együtt pedig a szén-dioxid elszivárgásának lehetőségét is. Azonban a beoldódás és az ásványképződés folyamata igen lassú, 10–100 éves időintervallumban lehet jelentősége, így a kiszemelt tárolóknak e folyamatok lejátszódása nélkül is alkalmasnak kell lenni a besajtolt szén-dioxid hosszú távú (több 100 év) visszatar-tására.

Az aquifertárolás általános feltételei

A letermelt szénhidrogéntelepek esetében a fentiekben felsorolt kritériumok általában teljesülnek. A „sós vizet” rezeruoárok esetében azonban már az előzetes kutatás részét kell, hogy képezze a felsorolt kritériumok teljesülésének vizsgálata. Ahhoz tehát, hogy egy terület alkalmas legyen a CO₂ hosszú távú, biztonságos tárolására, az alábbi feltételeknek kell teljesülni:

- 1) *A rezeruoár megfelelő mélysége*; azaz elegendően mély ahhoz, hogy a CO₂ superkritikus fluidumként legyen jelen, ugyanakkor nem olyan túlzottan mély, hogy a mélységgel járó kompaktió már a kőzet porozitásának és permeabilitásának számottevően a rovására menne.
- 2) *A fedőkőzet integritása*, vagyis záródása annak érdekében, hogy képes legyen megakadályozni a CO₂ elszökését.
- 3) *Kellően nagy CO₂-tárolópotenciál*, amely ahhoz szükséges, hogy a szén-dioxid-forrásból származó kibocsátás egészét a forrás teljes élettartama alatt képes legyen tárolni.



1. ábra Szén-dioxid viselkedése a sűrűség–mélység függvényében (Span és Wagner 1996 alapján)
Figure 1 The behavior of carbon dioxide as a function of pressure–depth (after Span and Wagner 1996)

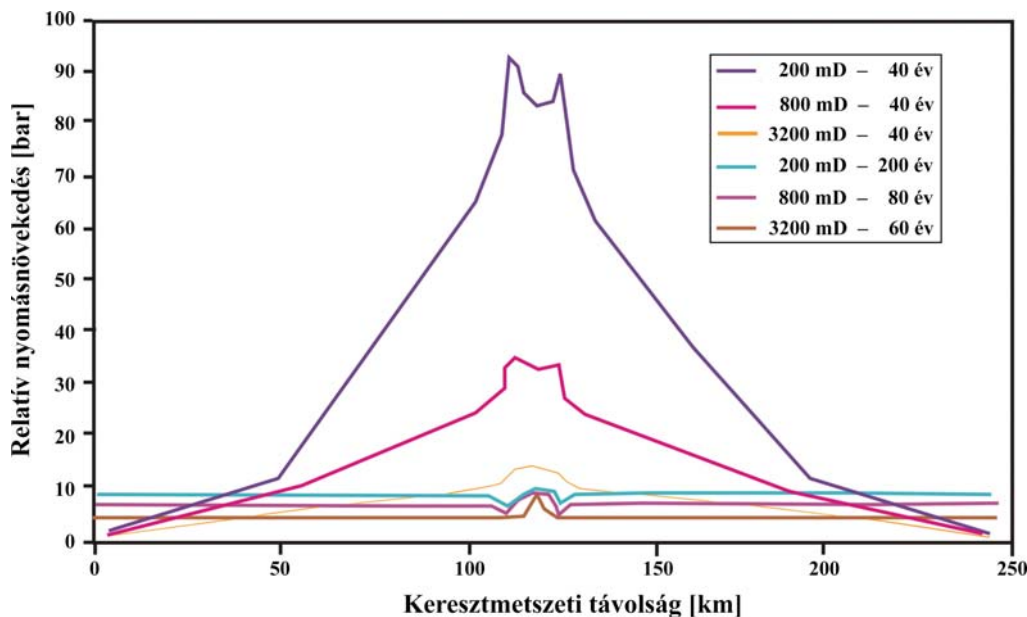
4) *Megfelelő rezervoárgeológiai paraméterek*, amelyek biztosítják az injektivitás gazdaságosságát, valamint a megfelelő mennyiségű CO₂ tárolhatóságát.

A rezervoár mélysége

A CO₂-ban gazdag gázok sűrűsége a növekvő nyomás hatására növekszik a mélységgel. Normál rezervoárkörül-mények között 600–800 m-es mélységintervallumban a CO₂

sűrűsége meredek emelkedést és egyúttal térfogatcsökke-nést mutat (1. ábra).

A kérdéses folyamat a geotermikus körülmények és a nyomás függvényében játszódik le. Mintegy nyolcszáz méter meghaladó mélységben a CO₂ sűrű fázisként (szuperkritikus fluidumként vagy cseppfolyós állapotban) van jelen. Ennél sekélyebb mélységben a CO₂ gázként van jelen a formációban. Ilyenkor azonban nem elég nagy a sűrűsége ahhoz, hogy a tárolása gazdaságos legyen. Ennek értelmében a tárolás megvalósítására 800



2. ábra Nyomásprofilok időbeli változása egy besajtolási helyszín keresztmetszetében 3 különböző permeabilitás esetében (Vangkilde-Pedersen 2009 alapján)
Figure 2 Cross section showing changes in the pressure profile in time in an injection area at three different permeabilities (based on Vangkilde-Pedersen 2009)

m-nél mélyebben elhelyezkedő formációk alkalmazása ajánlott.

A CO₂-ban gazdag gázokban lévő „szennyezőanyagok” (értsd, egyéb gázkomponensek) általában negatív irányban befolyásolják a gázok kompresszibilitását, ezért a rezervoárrok minimális mélységének meghatározásánál az összetételei tényezőt is figyelembe kell venni. A növekvő mélységgel, ugyanakkor, a diagenetikus átalakulások következtében általában folyamatosan csökken a rezervoárrok porozitása, valamint permeabilitása. Ez természetesen egyaránt negatív hatással van a tárolható CO₂ mennyiségére és a besajtolhatóságra is.

A rezervoár petrofizikai tulajdonságai

A tárolásra kiszemelt rezervoár bizonyos alapparamétereinek (pl. porozitás és permeabilitás) megfelelő tartományba kell esniük ahhoz, hogy a formáció alkalmas legyen a CO₂ tárolására. A nagy permeabilitásértékek a hatékony besajtolást, míg a nagy porozitásértékek a rezervoárban rendelkezésre álló, megfelelően nagy pórustérfogatot biztosítják. A megfelelő rezervoárrok kiválasztásakor az ideális permeabilitás- és porozitásértékeket minimum 200 mD és 10% érték-nél határozták meg. Fontos ugyanakkor megjegyezni, hogy ezek az értékek, különös tekintettel a permeabilitásra, inkább a tenger alatti „sósvides” rezervoárokra jellemzőek. Szárazföldi rezervoárrok esetében ez az érték 50 mD körüli, pl. a BP-Statoil-Hydro In Salah projektjénél hasonló értékek jellemzőek (Chadwick et al. 2007). A 2. ábrán a permeabilitás függvényében kialakuló nyomásprofil modelljét láthatjuk kétutas besajtolás esetében.

Jól látható, hogy míg nagy permeabilitások esetében a besajtolás következtében kialakuló nyomásnövekedés gyakorlatilag azonnal szétterjed az egész rezervoárban, addig kis permeabilitások esetében a nyomásnövekedés a besajtoló kutak közelében jelentős, míg azoktól távolabb a hatás lényegesen kisebb, és a nyomásnövekedés egyenletes eloszlására csak kb. 100 évvel a besajtolás megszűnése után lehet számítani. Ez a viselkedés viszont előrejelzi, hogy a besajtolás során lényegesen kisebb besajtolási rátát kell alkalmazni, mint amelyet a fedőkőzet rezervoárszinten elvisel, hiszen a kis permeabilitás következtében a besajtoló kút környékén a rezervoárra megadott nyomásnövekedés értékének akár többszöröse is kialakulhat (Vilarrasa et al. 2011), amely a fedőkőzet integritását markánsan befolyásolhatja.

Fedőkőzet integritása

A CO₂ környezetéhez képest kisebb sűrűségének köszönhetően a besajtolást követően a felszín felé törekszik. Éppen ezért szükség van olyan (fedő-) zárórétgre, amely lehetővé teszi a CO₂ hatékony visszatartását. Megfelelő zárotulajdonságokkal a kis permeabilitású kőzetek, mint pl. az agyagok, evaporitok és bizonyos karbonátok rendelkeznek. A fedőkőzet integritását, vagyis a jó záródást a kőzet vastagsá-

ga, a vetők és törések hiánya, valamint a CO₂ és a fedőkőzet között lejátszódó geokémiai folyamatok határozzák meg.

A fedőkőzet esetében a permeabilitásnak megfelelően alacsonynak kell lennie. A vastagság tekintetében a minimális elvárás mintegy 20 m (Chadwick et al. 2007). A fedőkőzetet átjáró vetők szintén nagymértékben csökkenthetik a szigetelés hatásfokát. Jelentősen növelheti a zárókőzet permeabilitását a nagyfokú heterogenitás is, hiszen pl. az agyagos kőzetbe települő homokos rétegek nagyban növelik a CO₂-szivárgás kockázatát. A fedőkőzet és a formációvízbe besajtott CO₂ beoldódása során kialakuló szénsav között fellépő reakció egyes területeken megváltoztathatja a fedőkőzet tulajdonságait, amely adott esetben szintén elősegítheti a szén-dioxid felszínre kerülését.

Tárolókapacitás

A kiszemelt tárolóknak megfelelően nagy kapacitással rendelkezniük ahhoz, hogy képesek legyenek befogadni a kiválasztott források teljes élettartamának kibocsátását. Erőművek esetében a névleges élettartam mintegy 20–30 év. Általánosan elfogadott feltétel, hogy a rezervoárknak lényegesen nagyobb tárolási kapacitással kell rendelkezniük, mint a szén-dioxid-forrásból várható szén-dioxid mennyisége.

Egy formáció tárolókapacitását a következő földtani paraméterek határozzák meg:

- csapdatípusok,
- törések,
- rezervoárheterogenitás,
- vastagság,
- területi kiterjedés,
- petrofizikai tulajdonságok.

„Sósvides” rezervoártípusok (csapdatípusok)

A tárolási potenciál egyrészt a rezervoár tulajdonságaitól függ, de a ténylegesen tárolható CO₂ mennyiségét nagyban befolyásolják a tároló határainak tulajdonságai is. Amennyiben egy aquifer teljesen zárt, a benne létrehozható, a CO₂ számára kitölthető pórustérfogatot a besajtolás hatására megnövekedett nyomás által összepréselt pórúsvíz és kőzet-tömeg térfogat-csökkenése hozza létre. Ezekben az esetekben fennáll a veszélye annak, hogy a besajtolás környezetében olyan túlnyomás alakul ki, amely megrepeszteti a fedőkőzetet, vagy meghaladja annak kapilláris küszöbnyomását, és a CO₂ számára szabad szivárgási út nyílik. A besajtolás által érintett rezervoárokat zárt, illetve nyílt típusokba lehet csoportosítani.

A zárt rezervoárokat 3 dimenziós zárószerkezet határolja le. Ezek az objektumok képesek lehetnek a környezettől hosszú ideig elszigetelve tárolni a besajtott CO₂-t. A nyílt rezervoárok elvileg szintén alkalmasak lehetnek a tárolásra. A nyílt rezervoárok esetében a fedőréteg ugyan nem enged közvetlen függőleges kiszivárgást, és a CO₂ migrálását közel vízszintes irányba kényszeríti, ám nem biztosítja a CO₂

tartós helyben maradását. Végző soron a CO₂ elérheti a rezervoár egy nem szigetelt részét és eltávozik a légkörbe, amennyiben más folyamatok (pl. beoldódás, kapilláriscsapódás) ezt nem akadályozzák meg.

Szén-dioxid-tárolási kapacitás becslése mentének bemutatása egy magyarországi példán – esettanulmány

A fentiekben ismertetett feltételek alapján megvizsgáltuk a „sós vizet” tárolás szempontjából potenciálisan alkalmas magyarországi kőzetkifejlődéseket. Előzetes vizsgálataink alapján számos, a tárolás alapvető kritériumainak eleget tevő földtani képződmény található hazánkban. Vizsgálataink kiterjedtek a medencebeli középső miocén és a pannóniai képződményekre. Az alábbiakban a hosszú távú, biztonságos tárolás szempontjából legalkalmasabbnak tűnő, pannóniai mélyvízi turbidit képződménycsoporton – a Szolnoki Formáción – keresztül mutatjuk be a szén-dioxid-tárolási kapacitás számításának lépéseit és előzetes eredményeit. Ez a képződménycsoport a csökkent sós vízű (ún. brakvízi) Pannon-tó legmélyebb részein lerakódott, zagyarákból gravitációs törmelék szállítással képződött vastag, agyagbetelepülésekkel sűrűn tagolt homokos rétegsor.

Az alábbiakban röviden ismertetjük, milyen szempontok alapján történt a Szolnoki Formáció képződményeinek szén-dioxid-tárolási célra történő kiválasztása.

A Pannon-medence mélymedencebeli pannóniai s.l. rétegsorának általános felépítése

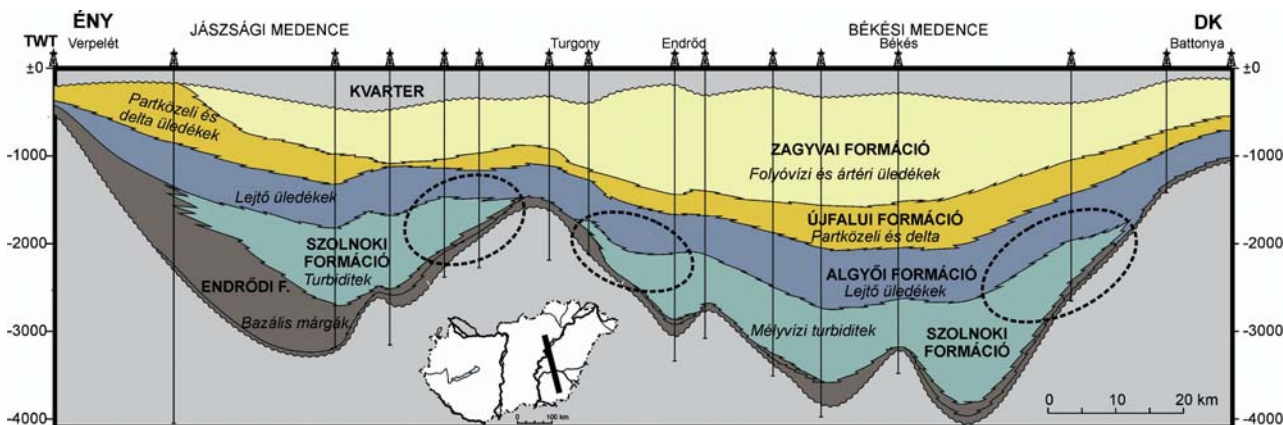
A Pannon-medence kialakulása jelenlegi formájában a kora és középső miocén során indult meg, amikor a Pannon-tó még tengeri kapcsolatokkal rendelkezett. A medencerend-

szel kialakulásával egy időben történt az alpi–kárpáti hegységrendszer kiemelkedése, amelynek lepusztulása jelentős tömegű üledékanyagot szolgáltatott. A medencét bonyolult tektonika, differenciális süllyedés és több behordási irány jellemezte. Erre a képre rakódik rá a relatív vízszintingadozások által kialakított finom és bonyolult mintázat. A medence architektúráját, geometriáját tehát bonyolult folyamatok összessége alakította, amelyek következtében ma egy tagolt, részmedencékre osztott medencerendszer rajzolódik ki előttünk.

A Pannon-tóban mélyvízi, medencelejtő és deltalejtő, sekélyvízi – partközeli, deltafront, deltasíkság és parti síkság –, valamint körülötte folyóvízi üledékképződési környezetek alakultak ki. Az ezekben a környezetekben lerakódott üledékes fáciesek az egykori progradáció következtében térben egymás fölött jelennek meg, fáciesegyütteseket alkotnak, amelyek egyre sekélyebb környezetre utalnak. Ezen egységek alkotják a különböző pannóniai formációkat, amelyek vastagsága külön-külön több száz métert is elérhet, és térben jól követhetők az egész Alföldön, valamint a dunántúli medencékben is.

A pannóniai s.l. litosztratigráfiai egységek aquiferes tárolás szempontjából történő minősítése és a kiválasztott képződmények elterjedése

Aquiferes szén-dioxid-tárolás szempontjából földtani léptékben, nagy vastagságú képződményekben gondolkodunk mind a tárolás, mind a zárás tekintetében. Így tárolás tekintetében a medencében előforduló nagy vastagságú fáciesegységek közül elsősorban az uralkodóan homokos felépítésű Szolnoki és az Újfalui Formációk képződményei jöhetnek számításba, míg a csak foltokban megjelenő Békési Formáció jóval kisebb közettömeget képvisel, de érdemes



3.a ábra ÉNY–DK irányú litosztratigráfiai és szedimentológiai szelvény az Alföld pannóniai s.l. rétegsorában, Verpeléttől a Jászsági-medencén és a közép-magyarországi alaphegységi kiemelkedéssoron, valamint a Békési-medencén át Battonyáig (Juhász 1992)

Figure 3.a NW–SE lithostratigraphic and sedimentological cross section in the Pannonian s.l. sequence. From Verpelét through the Jászság Basin, the Middle Hungarian basement high and the Békés Basin to Battonya (Juhász, 1992)

számolunk vele. A fő tárolóegységek fölött általában megtalálhatóak a záróképződmények, amelyek akár regionálisan is alkalmasak hidrodinamikai záródást alkotni. Ennek azonban az a feltétele, hogy az adott formációk teljesen agyagos, illetőleg aleuritos kifejlődésűek legyenek, másik feltétele pedig a vetők zárása, amelyek nem mindig állnak fenn. Ilyen regionális zárásra is alkalmasak az Újfalui Formáció fölött megjelenő, folyóvízi környezetben képződött Zagyvai Formáció finomabb szemcsés üledékeket tartalmazó rétegsora, illetve a Szolnoki Formáció fölött található, lejtő környezetben lerakódott, többnyire agyagos üledékekből álló Algyői Formáció (3.a ábra). A Zagyvai Formáció azonban csak ott agyagos, ahol ártéri képződményeket tartalmaz, az egykori mederövek területén záródás nincs, tehát kialakul a hidraulikai kapcsolat a két képződménycsoport között. Ezért ez további részletes vizsgálatokat igényel területenként.

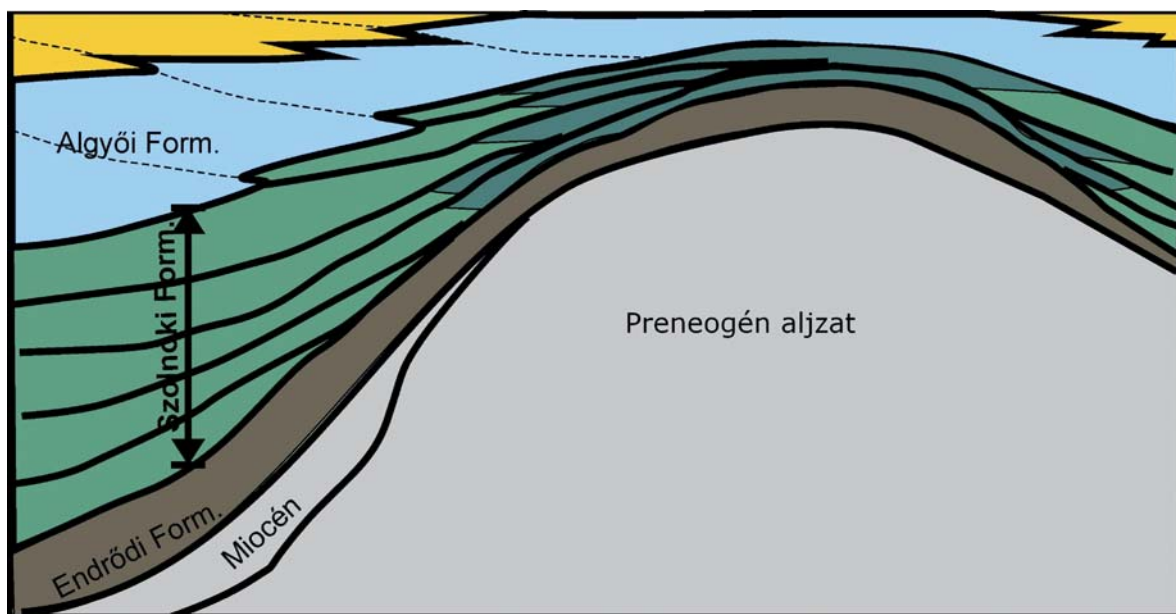
A két fő tároló–záró képződménycsoport-„pár” közül tehát, amely az Újfalui–Zagyvai Formációk és a Szolnoki–Algyői Formációk lehetnek, a további kritériumokat is figyelembe véve, mint a minimum 900 m-es mélység, és az a tény, hogy az Újfalui Formáció képződményei a fő termálvízadó összletet képviselik a medencében, valamint az, hogy egyes területeken a kvartertalpig felérnek, továbbá még néhány egyéb tényező alapján azt a következtetést vontuk le, hogy a Pannon-medencebeli képződmények sorában tárolásra legalkalmasabb a Szolnoki Formáció képződménycsoportja. Ezen belül is az alaphegységi kiemelkedésekre rálapoló, kiemelkedő összletet jöhetnek számításba.

Medenceméreteken a pannóniai s.l. üledékösszlet litostratigráfiai egységei térben viszonylag jó követhetőséget mutatnak az egyes medencerészekben, valamint a medencerészek között is, habár időtranszgresszív képződményekről van szó, amelyek az előrenyomuló partvonallal fokozatosan töltődtek fel. Ez egyben azt is jelenti, hogy lokálisan ugyan nem, de valamilyen nagyobb szinten, regionálisan, hidraulikailag összefüggő rendszert alkothatnak. Ugyanakkor az egyes homokkőrétegek között elválasztó márgák vannak, amelyek a kisebb egységek/rétegek között zárást adhatnak (Juhász 1998). Ezek azonban csak szerkezeti záródások esetén különülnek el. Nagyobb léptékben, illetve nagyobb vastagság esetén hidrodinamikai kapcsolat lehet és van közöttük.

A Szolnoki Formáció elterjedése, határai

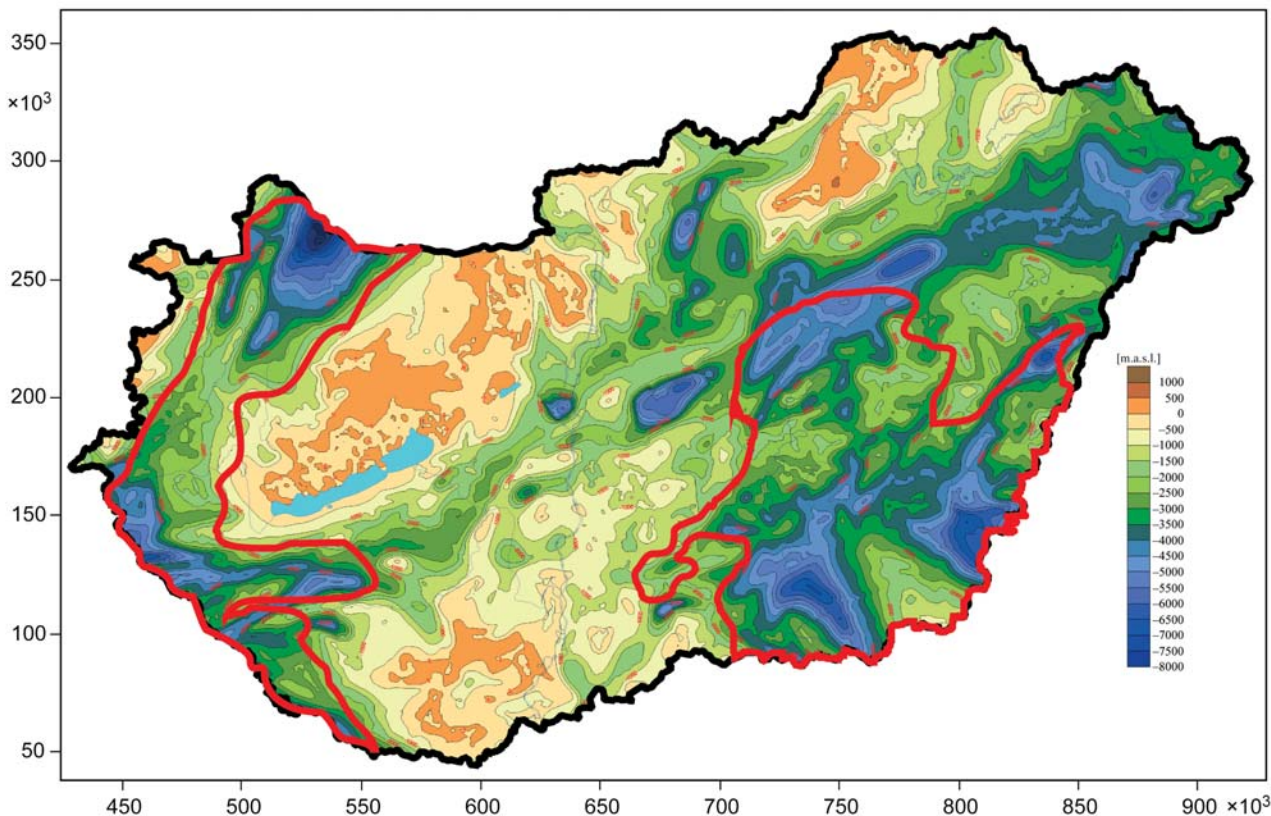
A Szolnoki Formáció elterjedése, mélység- és vastagságtérképe megrajzolható, bizonytalanságok csak a kis fúrássűrűséggel jellemzett kiemelkedési és összefogazódási, valamint a mélyzónákban adódnak, ahol minden újabb fúrás lemélyítésével reambulációra szorul a térképünk (pl. Jászsági-sülyledék, Derecskei-árok stb.). A turbiditek elterjedéstérképe látható a 4. ábrán. Az ábrázolt területeken a Szolnoki Formáció vastagsága általában 200–900 m között van, illetve a formáció teteje 900 m alatt található.

A Szolnoki Formáció elterjedése a medencerészek mély zónáira korlátozódik. Felszíne nagyjából követi az aljzatmorfológiát, az Alföldön Ny-i és É-i irányban 1000–1500 m-ig emelkedik, míg a legmélyebb zónákban 3500 m-re



3.b ábra A Szolnoki Formáció regionális léptékben egy hidrodinamikai rendszert képvisel. Ugyanakkor számos vékony homokkőtest építi fel, amelyek lokális léptékben külön telepet alkotnak. CO₂-elhelyezés szempontjából azonban az összes homokkőtestet, ill. réteget megnyitjuk egymás felett, és a teljes összletbe sajtolunk be, tehát a teljes tárolókapacitást kihasználjuk.

Figure 3.b The Szolnok Formation represents a single hydrodynamic system on regional scale. However, on local scale, the formation is built up by thin sandstone layers, which form separate units. In case of CO₂ storage the distinct layers shall be connected and injection should take place in the whole set of layers making the whole storage capacity available.



4. ábra | A Szolnoki Formáció (homokos turbiditösszlet) elterjedési területe az Alföldön a pre-tercier medencealjzat-térképen ábrázolva (Kummer 2003)

Figure 4 | Areal distribution of the Szolnok Formation (turbiditic sandstone) on the Great Hungarian Plain plotted on the pre-Tertiary basement depth map (Kummer 2003)

süllyed. A Szolnoki Formáció vastagsága a süllyedékekben meghaladja az 1000 m-t. A turbiditek térben nagyon jól követhető homokkőtesteket alkotnak.

A Szolnoki Formáció képződményeinek fáciese, az előforduló csapdatípusok és telepek

A Szolnoki Formáció a Pannon-tóban kialakult mélyvízi turbiditrendszer képződményeit foglalja magában a kapcsolódó fáciesekkel, amely a medencék legmélyebb részeit tölti ki. Gyakorlatilag megtalálható benne a gravitációs üledékképződés szinte minden eleme. Kőzettilag finomszemcsés homokkő, aleurolit- és agyagmárgarétegek változásából áll. A vastagabb homokkőrétegeket is kisebb ritmusok építik fel. A turbidit homokkőtestek meglehetősen heterogén térbeli eloszlásúak és geometriájúak. A zagyarak a medence mély részeit elérve jellegzetes morfológiájú legyező alakú törmelékűkőket alkotnak, amelyeket csatorna- és turbiditlebeny-homoktestek építenek föl, bizonyos törvényszerűségek szerint (Juhász 1998).

A Szolnoki Formációban kialakult telepek, a fentiekben vázoltak alapján helyenként térben jól követhető homokrétegeket alkotnak, másutt azonban kaotikus geometriájúak, rezervoargeológiai szempontból nehéz velük bánni. Nem is beszélve a kőzetfizikai paraméterek erős heterogenitásáról.

A homokrétegeket általában vékony agyagmárgarétegek tagolják, változó vastagságúak, és változóan szinttartóak.

A Szolnoki Formációban több fajta csapdatípus alakulhat ki. A leggyakoribb előfordulású a kompációs antiklinálishoz (boltozathoz) kötődő szerkezeti csapdatípus. Igen gyakori azonban a lejtőkön a kiemelődéses, illetőleg a fáciesváltozásos kőzettani csapda, valamint a porozitásváltozásos kőzettani csapda (3.b ábra). Kiemelkedések, tektonikusan zavart területek közelében tektonikus csapdák is kialakulnak.

A Dunántúlon található alsó-pannon telepek zöme ehhez a turbidites tárolótípushoz tartozik, mint pl. Budafa, Lovászi, Bajcsa, Inke, Görgeteg-Babócsa, Ortaháza. Az Alföldön turbidit homokkövek alkotják pl. a „kevertgázöv” egyes telepeit, Szarvas, Endrőd, Sarkadkeresztúr telepeinek egy részét.

A Szolnoki Formáció képződményeinek kőzetfizikai paraméterei

A Szolnoki Formáció mélyvízi turbidit homokkövei általában gyengébb kőzetfizikai paraméterekkel rendelkeznek, mint például az Újfalui Formáció homokkőtestei. Ez egyrészt a fácieséből adódik, de jelentős mértékben hozzájárul az is, hogy ezek a kőzetek már jóval mélyebben helyezked-

nek el, így a diagenetikus folyamatok során sokkal jobban elzáródott a porustér. A porozitásérték sok esetben viszonylag jó a turbidit homokkövekben (~20%), de az áteresztőképesség értékek igen alacsonyak lehetnek ($30\text{--}40 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$), és ezen belül is a függőleges áteresztőképesség-értékek rendkívül alacsonyak, amelyet a sok vékonyabb-vastagabb agyagmárga-betelepülés okoz.

Kapacitásbecslés módszertana a Szolnoki Formációban

Az alábbiakban a kiszemelt objektumra vonatkozó térfogatbecslés módszertanát, a becsült térfogatokot és a térfogatokhoz kapcsolódó tárolási potenciált mutatjuk be.

A kézzel rajzolt $M = 1 : 500\,000$ méretarányú Szolnoki Formáció mélység- és vastagságtérképeinek szkennelt, bitmap formában történő archiválása után a szintvonalak digitalizálására került sor. Az így kapott adatsorokból a Surfer 8 programban $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ méretű rácshálóba rendezett *grid* állományok jöttek létre a pontkriegelés módszerével. Ezek az állományok képezték a továbbiakban a Surfer 8 bemenetét a térfogatszámításokhoz. A térfogatszámítás előtt megvizsgáltuk és szükség esetén a területet szűkítettük azon feltételek teljesülésével, hogy a Formáció vastagsága minimum 200 méter legyen és a teteje 800 méternél mélyebben helyezkedjen el. A térfogatszámítást a földtani objektum vastagságának ismeretével a Surfer 8 programmal közvetlenül végeztük a módosított trapézszabály módszerével. Vastagságadatokkal csak a Szolnoki Formáció alföldi előfordulásai esetén rendelkezünk, így a továbbiakban az erre a területre eső előfordulásokat mutatjuk be.

Tárolási kapacitás becslése a kiválasztott területek esetében

Az alábbiakban három, a nemzetközi gyakorlatban a „sósvízes” rezervoárok CO_2 -tárolóképességének meghatározására használt kapacitásbecslési módszert vizsgálunk. Ezek a (gyors) becslési eljárások természetesen nem helyettesítik egy konkrét elhelyezési projekt során elvégzendő részletes rezervoármérnöki vizsgálatot és térfogat-meghatározást, de lehetővé teszik a kiszemelt rezervoár tárolókapacitásának nagyságrendi becslését.

CSLF által ajánlott módszer

A CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum – miniszteri szintű szén-dioxid-elhelyezéssel foglalkozó szervezet) ajánlását a „sósvízes” rezervoárok tárolási kapacitásának becslésére az alábbi egyenlet foglalja össze (Bachu et al., 2007):

$$M_{\text{CO}_2} = V \phi \rho_{\text{CO}_2} E, \quad (1)$$

ahol a

M_{CO_2} = tárolható CO_2 tömege (kg) az aquiferben,

ρ_{CO_2} = CO_2 sűrűsége (kg/m³) adott nyomáson és hőmérsékleten,

ϕ = a tároló átlagos porozitása,

V = az aquifer térfogata (m³),

E = a tárolási hatékonysági faktor, amely azt írja le, hogy a közettérfogat porustérfogatának mekkora részét tölti ki CO_2 .

A fent bemutatott megközelítéssel szemben – bár a tároló formáció és a szén-dioxid valós fizikai paramétereinek figyelembe vételével számol – komoly fenntartások fogalmazhatók meg, hiszen nem foglalkozik azzal a kérdéssel, hogy a CO_2 által kiszorított pórúsvíz hova távozik, egyáltalán tud-e távozni a rendszerből. Amennyiben a regionális aquiferek zárt hidrodinamikai rendszernek tekinthetők, a bennük – a CO_2 besajtolása által – létrehozott, a CO_2 által kitölthető pórústérfogat a nyomásnövekedés és a rendszer kompresszibilitása függvényében alakul ki. Ráadásul a tárolási hatékonysági faktor rezervoármérnöki szempontból nehezen értelmezhető fogalom. Mindenesetre, a kutatók által végzett Monte-Carlo-szimuláció alapján az ún. „tárolási hatékonysági faktor” értéke 50%-os valószínűséggel 2,2 és 1,8% közé esik (Frailey, 2007).

Szénhidrogén-termelés tapasztalatain alapuló eljárás

Célravezetőbbnek tűnik a föld alatti gáztárolási tapasztalatokra alapozó megközelítést alkalmazni. Ennek alapján a tároláshoz rendelkezésre álló térfogat számításánál az első esetben az effektív kompresszibilitásértékét vettük figyelembe, itt a Pápay (2007) által megadott közelítő értéket ($\sim 5 \times 10^{-5}$) használtuk a becslésnél. Az egyes területeknél a nyomásértéket – hidrosztatikus nyomást feltételezve – a területre jellemző átlagvastagság-érték alapján adtuk meg, és így számoltuk ki az elfogadható túlnyomás értékét ($\Delta p \approx 0,2 p_i$).

A víztartó rétegben tárolható CO_2 mennyiségét az alábbi képlet alapján határoztuk meg (Pápay, 2007):

$$M_{\text{CO}_2} = \phi c V \Delta p \rho_{\text{CO}_2}, \quad (2)$$

ahol

M_{CO_2} = a tárolható CO_2 tömege (kg) az aquiferben,

ϕ = aquifer porozitása,

c = effektív kompresszibilitás (1/bar) (közet és azt kitöltő víz) értéke $\sim 5 \times 10^{-5}$,

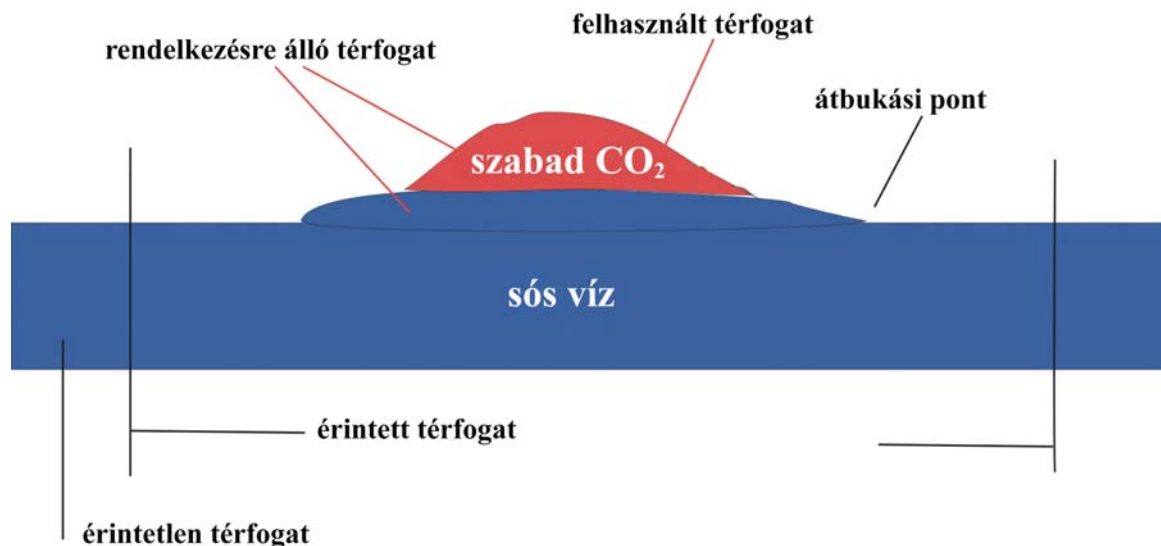
Δp = túlnyomás (bar); értéke: $\Delta p \approx 0,2 p_i$,

V = aquifer közettérfogata (m³), amelynek porozitása ϕ ,

ρ_{CO_2} = a CO_2 sűrűsége (kg/m³) adott nyomáson és hőmérsékleten.

Geocapacity–TNO becslési eljárás

Hasonló megfontoláson alapul a „Geocapacity–TNO” tárolókapacitás becslési eljárása, amely az Európai Unió „szabványos” kapacitásbecslési módszere. A módszer lényege, hogy bár a kapacitásbecslésre formailag az (1) egyenletet használja fel, a rendelkezésre álló térfogatot („available



5. ábra CO₂-tároló vázlatos rajza Vangkilde-Pedersen et al. (2008) alapján
Figure 5 Schematic figure of a CO₂ storage object based on Vangkilde-Pedersen et al. (2008)

1. táblázat Tárolási hatékonysági faktor, $V_{\text{össz}}/V_{\text{rend}}$ [%]. A $V_{\text{össz}}$ a teljes regionális „sós vizet” rezervoár térfogatát jelöli, míg a V_{rend} a rezervoár egy kisebb egységét, a záródó szerkezet térfogatát. (Lásd még 5. ábra; Vangkilde-Pedersen et al. (2008)). A tárolási hatékonysági faktort a GeoCapacity–TNO módszer használja.

Mélység [m]	1	5	10	50	100
1000	0,20	1,0	2,0	10	20
1500	0,30	1,6	3,0	16	30
2000	0,40	2,0	4,0	20	40
2500	0,50	2,6	5,0	26	50
3000	0,60	3,0	6,0	30	60
3500	0,72	3,6	7,2	36	72

space”) nem a teljes regionális aquiferre (feltételezve, hogy a regionális aquifer hidrodinamikailag összefüggő rendszert alkot) vonatkoztatja, hanem csak az aquifer azon kisebb egységeire, amelyeket *záródó szerkezet* fed le. E szűkebb térfogatokra vonatkozóan a tárolási hatékonysági faktort a záródó szerkezet által lehatárolt térfogatrész és a teljes érintett térfogatrész aránya, illetve a létrehozható nyomáskülönbség határozza meg. A rendelkezésre álló tárolókapacitás becslése ugyanakkor csak formailag egyezik a fentiekben bemutatott (1) egyenlettel, tartalmi szempontból a kompresszibilitás és a lehetséges túlnyomás értékeit veszi figyelembe (Vangkilde-Pedersen 2009).

A rendelkezésre álló térfogatrész (*Available Space*) vázlatos szerkezetét és lényeges elemeit a 5. ábra szemlélteti. Az alábbi táblázatban (1. táblázat) a hidrodinamikailag összefüggő térfogat (regionális aquifer) és a fenti definíció szerinti rendelkezésre álló térfogatrész aránya, valamint a rezervoármélység függvényében (feltételezve, hogy a rendszerben 20% túlnyomás hozható létre) tartalmazza a tárolási hatékonysági faktorokat (százalékban).

$$M_{\text{CO}_2} = VNG \varphi \rho_{\text{CO}_2} S_{\text{eff}}, \quad (3)$$

ahol

M_{CO_2} = tárolható CO₂ tömege (kg) az aquiferben,

V = a regionális víztároló térfogata (m³),

NG = a zárt szerkezetek és regionális víztartó térfogataránya,

φ = aquifer porozitása,

ρ_{CO_2} = a CO₂ sűrűsége (kg/m³) adott nyomáson és hőmérsékleten,

S_{eff} = a tárolás hatékonysági tényezője.

Mindhárom esetben a trapékszabály alkalmazásával számítottuk ki a kiszemelt regionális aquifer közettérfogatát. A porozitásértékeket a területeken a szénhidrogéntelepekből megismert és a formáció mélységtartományába eső porozitás adatok segítségével becsültük meg. Ismerve a térfogatok, Span és Wagner (1996) kísérleti munkája alapján megállapítottuk a CO₂ sűrűségét az adott nyomáson és hőmérsékleten.

A 2. táblázatban a formációra becsült szén-dioxid-tárolókapacitások láthatók, az első esetben a Pápay (2007) alapján meghatározott módon, a másik oszlopban a „GeoCapacity–TNO” módszer alapján 0,2% tárolási hatékonysági faktort

2. táblázat | A kiválasztott formációk elméleti CO₂-tárolókapacitása

	Tárolókapacitás [t] (kompresszibilitással)	Tárolókapacitás [t] (0,2% tárolási hatékonysági faktorokkal „GeoCapacity–TNO”)	Tárolókapacitás [t] (1%-os tárolási hatékonysági faktorokkal „CSLF”)
Észak-Alföld	1,5–2,0 × 10 ⁸	1,5–2,0 × 10 ⁸	0,75–1,25 × 10 ⁹
Dél-Alföld	5,0–5,5 × 10 ⁸	3,5–4,5 × 10 ⁸	1,05–2,5 × 10 ⁹
Összesen a Szolnoki Formáció	6,5–7,5 × 10 ⁸	5,0–6,5 × 10 ⁸	1,8–3,75 × 10 ⁹

vettük figyelembe, a harmadik oszlopban pedig a „CSLF” által javasolt megközelítést alkalmaztunk konzervatív, 1%-os tárolási hatékonysági faktor alkalmazása mellett.

A „sósvides” rezervoárok számbavételekor és tárolókapacitásának megbecslésekor a beoldódás és ásványképződés nélküli tárolókapacitást vettük figyelembe. Számítási eredményeink alapján a Szolnoki Formáció potenciális földtani tárolóobjektumaiba besajtolható CO₂ mennyisége Magyarországon mintegy 1500–3500 millió tonna.

Megállapítható, hogy a vizsgált területeknél nem mutatkozik jelentős eltérés a tárolókapacitás vonatkozásában a „GeoCapacity–TNO”-féle és a gáztárolási tapasztalaton alapuló számítási mód alkalmazása esetén. A „CSLF”-féle számítási mód esetén viszont már nagyobb, ~4–5-szörös a tárolási kapacitás elvi értéke, mint a másik két CO₂-tárolási kapacitásbecslés eredménye esetén. Fontos megjegyezni, hogy a 2. táblázatban bemutatott értékek az adott formációban egy adott területre vonatkozó maximálisan tárolható CO₂ mennyiségét jelentik feltételezve, hogy a teljes formáció 1 hidrodinamikai egységként működik.

A fenti érték a képződmények egészében elméletileg maximálisan tárolható CO₂ mennyiségét jelenti. A ténylegesen tárolható szén-dioxid mennyiségét (és a tárolás helyét) a formációban az adott területen lévő záródó szerkezetek mérete és elhelyezkedése, valamint a záródó szerkezettel hidrodinamikai kapcsolatban lévő víztest mérete határozza meg. Ezekre a záródó szerkezetekre, illetve a hidrodinamikai egységek méretére vonatkozó információk egyelőre nem állnak rendelkezésre. A „sósvides” víztartó rétegekben történő tárolás előmozdításának egyik legfontosabb feltétele a formációban lévő záródó szerkezetek feltérképezése és a hidrodinamikai egységek lehatárolása.

Összefoglalás, további tervek

Három, a nemzetközi gyakorlatban a „sósvides” rezervoárok CO₂-tárolóképességének meghatározására használt kapacitásbecslési módszerrel (CSLF, Geocapacity–TNO, szénhidrogén-termelés tapasztalatain alapuló módszer) becsültük a Szolnoki Formáció alföldi területének szén-dioxid-tárolási kapacitását. A Szolnoki Formáció az az objektum, amely elsődleges vizsgálataink alapján a leginkább alkalmas földtani léptékben is hosszú távon, biztonságosan, kellően nagy méretekben tárolni a besajtolt szén-

dioxidot, és amelyről kellő mennyiségű információval rendelkezünk.

Ezek a becslési eljárások lehetővé teszik a potenciális rezervoár tárolókapacitásának nagyságrendi becslését. A CSLF ajánlásával kapcsolatban komoly fenntartások fogalmazhatók meg, mivel azzal a kérdéssel, hogy a CO₂ által kiszorított pórúsvíz hova távozik, egyáltalán tud-e távozni a rendszerből, nem foglalkozik. A „Geocapacity–TNO” tárolókapacitás-becslési eljárása, amely az Európai Unió „szabványos” kapacitásbecslési módszere, már feltételezi, hogy ismerjük a „sósvides” rezervoárban lévő záródó szerkezet térfogatát. De az elsődleges becslések esetén a záródó szerkezet térfogatát még nem ismerjük, mivel ennek megállapítására komoly – illetve költséges – földtani, geofizikai vizsgálatok szükségesek.

A „sósvides” rezervoár tárolókapacitásának megbecslésekor a beoldódás és ásványképződés nélküli tárolókapacitást vettük figyelembe. Számítási eredményeink alapján a Szolnoki Formáció potenciális földtani tárolóobjektumaiba besajtolható CO₂ mennyisége csak az alföldi területeken mintegy 650–750 millió tonna. Azonban a ténylegesen tárolható szén-dioxid mennyiségét (és a tárolás helyét) a formációban az adott területen lévő záródó szerkezetek mérete és elhelyezkedése, valamint a záródó szerkezettel hidrodinamikai kapcsolatban lévő víztest mérete határozza meg. Ezekre a záródó szerkezetekre, illetve a hidrodinamikai egységek méretére vonatkozó információk egyelőre nem állnak rendelkezésre. A következő lépések a „sósvides” rezervoárakban történő tárolás előmozdítására a formációban lévő záródó szerkezetek feltérképezése és a hidrodinamikai egységek lehatárolása lennének, ennek megvalósítása a nagy költségek miatt csak Európai Unió pályázatok és hazai összefogással lehetséges.

A szóba jövő jelentős közzétér fogatok ellenére sincs területegységenként korlátlan tárolókapacitás. Ráadásul a nagy érintett területek miatt a monitorozást – vagy legalább is bizonyos vizsgálatokat – is nagy területre kell kiterjeszteni, ami tovább növelheti a tárolási költségeket.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a MOL Nyrt.-nek és az MBFH-nak a szükséges adatok rendelkezésre bocsátásáért. A kutatás elvégzéséhez az OTKA (T-060861) támogatása is hozzájárult. Köszönjük Dr. Posgay Károly gondos lektori munkáját és értékes tanácsait.

Hivatkozások

- Bachu S., Bonijoly D., Bradshaw J., Burruss R., Christensen N.P., Holloway S. and Mathiassen O.M., 2007: Estimation of CO₂ Storage Capacity in Geological Media – Phase 2. Work under the auspices of the Carbon Sequestration Leadership Forum (www.cslforum.org).
- Chadwick A., Arts R., Bernstone C., May F., Thibeau S., Zweigel P., 2007: Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers: observations and guidelines from the SACS and CO2STORE Projects.
- Frailey S., 2007: Estimation of the Storage Efficiency Factor for Saline Formations. Appendix 1. In: Methodology for Development of Carbon Sequestration Capacity Estimates. Appendix A in Carbon Sequestration Atlas of the United States and Canada. U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory 86.
- IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 2008: “Carbon Capture and Storage: Meeting the Challenge of Climate Change”, IEA/OECD, Paris.
- IPCC Fourth Assessment Report, 2007: Climate Change
- Juhász Gy., 1992: A pannóniai s.l. formációk térképezése az Alföldön: elterjedés, fácies és üledékes környezet. (Pannonian s.l. lithostratigraphic units in the Hungarian Plain: distribution, facies and sedimentary environments). Földtani Közlöny, Budapest 122/2–4, 133–165
- Juhász Gy., 1998: A magyarországi neogén mélymedencék pannóniai képződményeinek litosztratiográfiája. In: Magyarország geológiai képződményeinek rétegtana, Bérczi I., Jámor Á. (szerk.). Magyar Olajipari Részvénytársaság és a Magyar Állami Földtani Intézet kiadása, Budapest, pp. 469–484
- Kummer I., 2003: Magyarország földtani térmodellje. ELGI Zárójelentés – Magyar Állami Földtani, Geofizikai és Bányászati Adattár
- Pápay J., 2007: A CO₂-összegyűjtés és földtani szerkezetekben történő tárolás rezervoár és geomérnöki irányelvei.
- Span R., Wagner W., 1996: A New Equation of State for Carbon Dioxide Covering the Fluid Region from the Triple-Point to 1100 K at Pressures up to 800 MPa. J Phys Chem Ref Data 25, 1509–96
- Vangkilde-Pedersen T., 2009: WP4.2 Aquifer capacity estimation; GeoCapacity results and the future for geological storage of CO₂, EU GeoCapacity open final Conference, Copenhagen
- Vangkilde-Pedersen T., Lyng Anthonsen K., Smith N., Kirk K., Neele F., van der Meer B., Le Gallo Y., Bossie-Codreanu D., Wojcicki A., Le Nindre Y.-M., Hendriks C., Dalhoff F., Christensen N. P., 2009: Assessing European capacity for geological storage of carbon dioxide – The EU GeoCapacity project, ScienceDirect Energy Procedia 1, 2663–2670
- Vangkilde-Pedersen T., Neele F., Wojcicki A., Bossie-Codreanu D., 2008: Storage capacity standards. EU GeoCapacity deliverable D24, 22.
- Vilarrasa V., Olivella S., Carrera J., 2011: Geomechanical stability of the caprock during CO₂ sequestration in deep saline aquifers. Energ. Proc. 4, 5306–5313