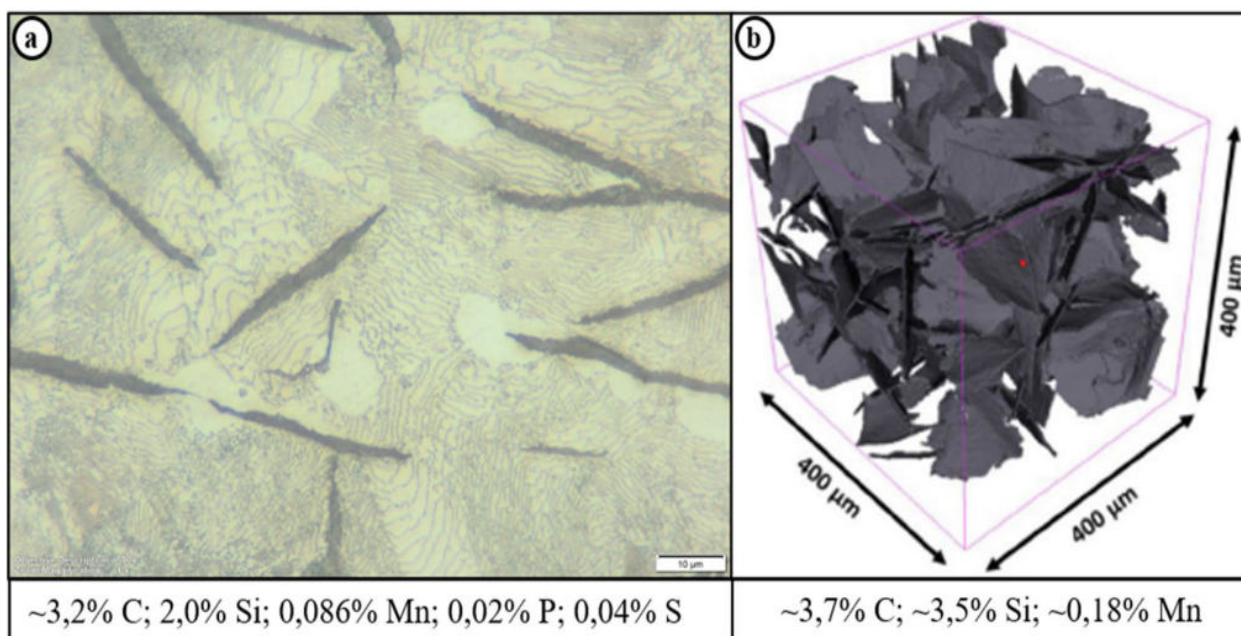


Egy közel 150 éves öntöttvas vízvezetékcső grafitos korróziójának mikroszerkezeti vizsgálata

Microstructural investigation of graphitic corrosion in an approximately 150-year-old cast-iron water pipe

TÖRÖK TAMÁS ISTVÁN, KONCZ-HORVÁTH DÁNIEL, HEGEDÜS BALÁZS,
MÁDI LAURA



Grafitos (szürketötötű) öntöttvas minták mikroszerkezete: (a) optikai mikroszkópos 2D felvétel [7];
(b) háromdimenziós röntgenmikroszkópos (3D-XRM) rekonstrukció [8]

FROM THE CONTENTS

GERGŐ FEHÉR, ISTVÁN BALÁZS ILLÉS: Recovery of pure rare earth elements from waste data storage devices as magnet precursors via a hydrometallurgical route combining precipitation and chelating cation exchange techniques ... 2

TAMÁS ISTVÁN TÖRÖK, DÁNIEL KONCZ-HORVÁTH, BALÁZS HEGEDŰS, LAURA MÁDI: Microstructural investigation of graphitic corrosion in an approximately 150-year-old cast-iron water pipe ... 15

ÁKOS BOROS: Artificial intelligence in alginite research – Reinterpreting a forgotten Hungarian mineral resource for climate adaptation and water retentionn ... 27

ÁRPÁD ÓSZ SR.: Questions and answers when preparing to implement a geothermal concessiond ... 34

RÓBERT GUSZTÁV PÁLINKÁS: “Where Is the Miner’s Homeland?” – or Carl Stegmayer and the Third Miners’ Anthem – Part 1 ... 55

Támogatóink



Magyar Tudományos Akadémia



FémAlk Zrt.



ACUFER Kft.



Magyar Villamos Művek



OMYA Hungária Kft.



Ózdi Acélművek Kft.



MOL Magyarország

Felelős szerkesztő:

Hajnal József

E-mail:
hirfor2000@gmail.com

A Szerkesztőbizottság tagjai:

Bariczáné Szabó Szilvia, Bíró Nóra,
Dr. Dovrtel Gusztáv, Fisch Iván,
Dr. Földessy János,
Dr. Harcsik Béla, Dr. Kóródi István,
Livo László, Lois László,
Molnár József, Molnár Zsolt,
Pali Sándor, Schudich Anna,
Dr. Szabó Tibor, Székács Annamária,
Dr. Szunyog István, Dr. Tardy Pál,
Dr. Török Tamás, Dr. Vadászi Marianna
Dr. Vojuczki Péter

Magyar nyelvi lektorálás:

Keményváriné Nagy Alexandra

Kiadja:

Országos Magyar Bányászati és
Kohászati Egyesület (OMBKE),
1107 Budapest, Hizláló tér 1.
Telefon/Fax: 1-201-7337
www.ombke.hu

A kiadásért felel:

Tóth Gergely László

Belső tájékoztatásra,
kereskedelmi forgalomba nem kerül.
A közölt cikkek fordítása, utánnyomása,
sokszorosítása és adatrendszerekben való
tárolása kizárólag a kiadó engedélyével
történhet.

A BKL lapszámai az OMBKE
honlapján – www.ombke.hu –
érhetők el.

HU ISSN 3057-9899 (Online)

TARTALOM

FEHÉR GERGŐ, ILLÉS ISTVÁN BALÁZS:

Adattároló eszközök hulladékából történő tiszta ritkaföldfém-
visszanyerés mágnesprekursorok formájában hidrometallurgiai
úton precipitációs és kelátképző kationcserés technikák
kombinálásával 2

TÖRÖK TAMÁS ISTVÁN, KONCZ-HORVÁTH DÁNIEL, HEGEDÜS BALÁZS, MÁDI LAURA:

Egy közel 150 éves öntöttvas vízvezetékcső grafitos korróziójának
mikroszerkezeti vizsgálata 15

BOROS ÁKOS:

Mesterséges intelligencia az alginitkutató szolgálatában –
Egy elfeledett magyar nyersanyag újraértelmezése a klíma-
adaptáció és a vízmegtartás tükrében 27

ID. ŐSZ ÁRPÁD:

Kérdések és válaszok egy geotermikus koncesszió
megvalósításának előkészítése során 34

PÁLINKÁS RÓBERT GUSZTÁV:

„Bányász hazája merre van?” – avagy Carl Stegmayer
és a harmadik bányászhimnusz – 1. rész 55

(for English titles see B2 page)

Címlapon:

Egy közel 150 éves öntöttvas vízvezetékcső grafitos korróziójának mikro-
szerkezeti vizsgálata

Az írás történeti öntöttvas vízvezetékek hosszú távú korróziós folyama-
tainak és a grafitos korrózió kialakulásának jobb megértését célozza
(publikáció a 15. oldalon)

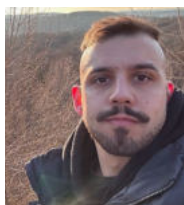
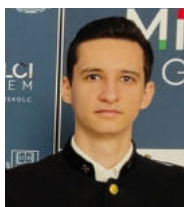
A kiadvány a Magyar Tudományos Akadémia támogatásával jelenik meg.

Adattároló eszközök hulladékából történő tiszta ritkaföldfém-visszanyerés mágnesprekurzorok formájában hidrometallurgiai úton precipitációs és kelátképző kationcserés technikák kombinálásával

Recovery of pure rare earth elements from waste data storage devices as magnet precursors via a hydrometallurgical route combining precipitation and chelating cation exchange techniques

FEHÉR GERGŐ¹, ILLÉS ISTVÁN BALÁZS²

¹Laboratóriumvezető, ²Op. Ex. Director Growwwer
Metal Waste Solution Kft., Miskolc



A jelen tanulmány a hulladékká vált adattároló eszközökből származó mágnesek ritkaföldfém-tartalmának visszanyerését vizsgálja. A kiszertelt mágneseket demagnetizáltuk, majd pofás törőgépben, 2 mm-es rés méret alkalmazásával finom porrá aprítottuk. A kapott port sósavas lúgzásnak vetettük alá, azonban az így nyert kloridos ritkaföldfémoldat jelentős vas-, nikkel-, kobalt- és mangánszennyezést tartalmazott. A termodinamikai vizsgálatok alapján a fő szennyezők nagy tömegű leválasztását goethit és oxidatív precipitációval, míg a finomtisztítást ioncserés eljárással végeztük. A precipitáció során a szennyezők több mint 98%-át sikerült eltávolítani mintegy 3%-os ritkaföldfém-veszteség mellett. A neodímiumot, a prazeodímiumot és a diszpróziumot ezt követően kelátképző kationcserélő kromatográfiával egy tiszta oldatfrakcióba választottuk el. A ritkaföldfémeket oxalátos precipitációval csaptuk ki, majd a csapadékot 800 °C-on izzítva 99,9% tisztaságú, didímiumalapú keverénoxidot állítottunk elő. Noha a bemutatott eljárás rendkívül biztató eredményeket hozott, az elválasztás finomhangolása és a kihozatal optimalizálása további kutatást igényel.

Kulcsszavak: adattároló, ritkaföldfém, újrahasznosítás, hidrometallurgia

This study investigates the recovery of rare earth elements from magnets derived from end-of-life data storage devices. The dismantled magnets were demagnetized and subsequently crushed into a fine powder using a jaw crusher with a 2 mm gap setting. The resulting powder was subjected to hydrochloric acid leaching; however, the obtained chloride-based rare earth solution contained significant iron, nickel, cobalt, and manganese impurities. Based on thermodynamic evaluations, the bulk separation of the main impurities was carried out by oxidative precipitation, while fine purification was performed using an ion exchange process. During precipitation, over 98% of the impurities were successfully removed with a rare earth loss of approximately 3%. Neodymium, praseodymium, and dysprosium were then separated into a pure solution fraction using chelating cation exchange chromatography. The rare earth elements were precipitated via oxalate precipitation, and the precipitate was subsequently calcined at 800 °C to produce a 99.9% pure, didymium-based mixed oxide. Although the presented method yielded highly promising results, the fine-tuning of the separation process and the optimization of the overall yield require further research.

Keywords: data storage device, rare earth metal, recycling, hydrometallurgy

1. Bevezetés

A modern digitális gazdaság motorja az adat, amelynek exponenciálisan növekvő halmazát – a felhőalapú szolgáltatásoktól a mesterséges intelligenciáig – ma is túlnyomórészt a merevlemez-meghajtók, azaz a HDD-k tárolják. Noha a fogyasztói piacon az SSD-k hódítanak, az adatközpontok költséghatékonysági okokból továbbra is erre az elektromechanikus technológiára támaszkodnak. Ez a hatalmas adatigény azonban magával vonja a hardverek gyorsuló avulását is: a 3–5 éves frissítési ciklusok [1] miatt az elektronikai hulladék (*e-waste*) mennyisége rohamosan nő [2]. A kislejtezett HDD-ket jelenleg gyakran adatbiztonsági okokból leselejtezik, ami óriási erőforráspazarlás, hiszen nagy koncentrációban tartalmaznak olyan kritikus nyersanyagokat, amelyek bányászata és kohászata környezetszennyező és geopolitikailag kockázatos [3]. Ilyen a Co, Ni és a lantanoidák, azaz a ritkaföldfémek. Ebben az összefüggésben válik stratégiai kérdéssé a neodímium (Nd) visszanyerése, amely a merevlemezek olvasófejét mozgató lengőtekerces motorok lelke. A neodímium-vas-bór ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) mágnesek alkalmazása nem véletlen; ezek az ötvözetek rendelkeznek a jelenleg ismert legmagasabb mágneses energiasűrűséggel, ami lehetővé teszi a precíziós alkatrészek extrém miniaturizálását. A neodímium atomi szerkezetéből adódó magas mágneses kristályanizotrópia biztosítja, hogy a mágnesek rendkívüli remanenciával (maradandó mágnességgel) és koercitivitással rendelkezzenek, azaz ellenálljanak a külső zavaró tereknek, és stabil, erős mezőt tartsanak fenn [4]. Ez a fizikai stabilitás elengedhetetlen az író-olvasó fejek nanométeres pontosságú pozicionálásához. Mivel a zöldtechnológiák, például az elektromos autók és szélturbinák iránti kereslet is ezekre az anyagokra épül, a HDD-k hulladékából történő kinyerésük már nem csupán környezetvédelmi opció, hanem a fenntartható ipari körforgás és a nyersanyag-függetlenség alapfeltétele.

2. A ritkaföldfémek extraktív metallurgiája

2.1. Primer metallurgia

A ritkaföldfémek (REE) kohászata az egyik legösszetettebb metallurgiai folyamat a fémkinyerő iparban [5]. A neodímium példáján keresztül jól szemléltethető, miért jelent kihívást ezen elemek kinyerése és tisztítása. Noha a „ritkaföldfém” elnevezés azt sugallja, hogy ezek az elemek alig fordulnak elő, a valóságban a neodímium bőségesen jelen van: átlagos koncentrációja a földkéregben 27–33 ppm (mg/kg). Ezzel gyakoribb, mint az ólom vagy a réz bizonyos típusú ércei. A nehézséget nem az abszolút mennyiség, hanem a geológiai eloszlás jelenti. A neodímium ritkán

dúsul fel önálló, gazdaságosan kitermelhető telepekké; leggyakrabban más ásványok (például basztnezeit, monacit vagy xenotim) rácsába beépülve, elszórtan található meg. A kitermelés további gátja a jelentős környezeti kockázat. Az elsődleges ércek gyakran tartalmaznak radioaktív elemeket, például tóriumot és uránt, amelyek a dúsítás során veszélyes meddőként halmozódnak fel, rendkívül költségessé téve a hulladékkezelést. A legnagyobb kohászati kihívás a fémek kinyerése utáni szétválasztás. A ritkaföldfémek kitermelésre alkalmas ércei általában a lantanoidák teljes sorozatát tartalmazzák, mely elemek kémiai viselkedése – a belső 4f alhéj fokozatos feltöltődése [6] és az úgynevezett lantanoidakontrakció miatt – szinte azonos [7]. Az ionrádiuszok minimális különbsége miatt a hagyományos hidrometallurgiai (például a hidrolitikus precipitációs) eljárások nem alkalmasak az egyes elemek szelektív elválasztására. Ezért leggyakrabban úgynevezett *mischmetall* állítanak elő, ilyen a Ce-mischmetall is. Utóbbit az acélkohászatban, az űsmetallurgiai kezelések során rendkívül erős dezoxidáló és kéntelenítőszerként, valamint hatékony zárványmodifikátorként alkalmazzák. A mischmetall a fő komponense (Ce) mellett szinte az összes ritkaföldfémeket tartalmazza; előállítása általában kalciotermitikus redukcióval vagy kloridos sók tüzzel folyó oldatának elektrolízisével történik.

A nagy tisztaságú ritkaföldfémek előállítása a metallurgia egyik legösszetettebb részterülete. Az ércdúsítás során nyert koncentrátumok kémiai feltárása alapvetően két technológiai útvonalon valósítható meg: kénsavas vagy lúgos feltárással. A kénsavas eljárás során a dúsítmányt 200 °C-on, 97%-os töménységű kénsavval kezelik. A folyamat során keletkező szulfátos zagy vizes lúgzásakor a lantanoidák oldható szulfátok formájában az oldatfázisba kerülnek. Ezzel szemben az alkalikus feltárás 160 °C-on, 40–50%-os nátrium-hidroxid-oldattal történik; ebben az esetben a lantanoidák oldhatatlan hidroxidsapadékként maradnak vissza, miközben a kísérő szennyezők (például a szilikátok vagy foszfátok) beoldódnak és szelektíven eltávolíthatóvá válnak. A technológiai folyamat következő kritikus lépése a kísérő radioaktív elemek, elsősorban a tórium elkülönítése, amely gyakran szelektív oxalátos precipitációval történik a ritkaföldfém-oldatból. A szennyezőmentesített, vegyes lantanoidaoldat ezt követően kerül a finom elválasztási szakaszba, ahol az egyes elemek egyedi kinyerése valósul meg.

A legelterjedtebb eljárás az oldószeres extrakció [8]. A folyamat során a lantanoidákat tartalmazó vizes fázist egy szerves fázissal (alifás oldószerrel pl. Shellsol D70 és komplexképző extrahálószerrel, például P507 vagy Cyanex) érintkeztetik. Az extrahálószer molekulái valamelyest erősebben kötődnek a nehezebb lantanoidákhoz. Mivel az egyensúlyi állandók

közötti különbség csekély, a kívánt tisztaság eléréséhez több száz fokozatból álló extrakciós kaszkádokra van szükség, ahol a célkomponens lépésről lépésre dúsul fel. Ehhez kapcsolódóan érdemes megemlíteni, hogy a hidrometallurgiában nehéznek tartott Co-Ni elválasztása is kivitelezhető 11 egymást követő extrakciós lépésben pl. a Cyanex 272 reagenssel.

Amennyiben az oldószeres extrakcióval elérhetőnél is nagyobb tisztaság a cél, a legprecízebb elválasztási módszerként az ioncserés kromatográfiát alkalmazzák, amely szilárd polimer gyantát használ [9]. A folyamat során az oldatot nagyszámú, sorba kötött, jellemzően 1,5 méter magas és 15 cm átmérőjű kromatográfiás oszlopon vezetik keresztül rendkívül alacsony áramlási sebesség mellett [10]. A szelektivitást etilén-diamin-tetraecetsav komplexképző oldattal végzett eluálás biztosítja, amely a lantanoidák eltérő komplexstabilitását kihasználva fokozatosan választja le az egyes elemeket. Ez a technika lehetővé teszi az akár 99,99%-os (4N) tisztaságú ritkaföldfém-frakciók előállítását is. A tiszta vegyületekből a fémformát két fő úton állítják elő: i) olvadékelektrolízis, ii) metallo-termia. A könnyebb lantanoidák esetében alkalmazott eljárás kloridos olvadékrendszerekben vagy alkáli- és alkáliföldfém-fluorid olvadékban szolubilizált oxid-elektrolitok felhasználásával történik.

A metallo-termia összetett folyamat. La, Ce, Pr és Nd esetében vízmentes kloridjaikból indulnak ki, amelyeket 1100 °C-on magneziotermitikus redukciónak vetnek alá [11]. A keletkező $MgCl_2$ mellékterméket – a titánkohászathoz hasonlóan [12] – vákuumdesztillációval távolítják el a kapott fémszivacsból [13]. A Gd, Lu, Sc, Sm, Eu és Yb kinyerése lantanotermiával valósítható meg 1100–1300 °C közötti tartományban. A speciális fizikai tulajdonságú Sm, Eu és Yb esetében a redukciót követően vákuummetallurgiai úton, szelektív illósítással (szublimációval/desztillációval) különítik el ezeket a fémeket a kohászati maradványoktól.

A korábban ismertett hidrometallurgiai szétválasztási eljárások hatékonyságát és gazdaságosságát azonban alapvetően a rendelkezésre álló kiindulási anyag minősége határozza meg. Ha összevetjük a primer és szekunder forrásokat, a koncentrációbeli különbségek rávilágítanak arra, miért tekinthetünk a HDD-kre stratégiai nyersanyagforrásként, ugyanakkor fontos különbséget tenni a teljes hulladékáram és a szeparált frakció között. A természetes ércekben (például basztneztben vagy monacitban) a ritkaföldfémek koncentrációja a közet teljes tömegére vetítve viszonylag alacsony: a neodímium jellemzően 1–5%, a praeodímium pedig 0,5–1,5% közötti tartományban mozog [5]. Egy átlagos, teljes HDD-egység tömegére vetítve – a ház, a korongok, valamint a vezérlő áramköri lap jelenléte miatt – a neodímiumkoncentrációja

nagyjából 0,5–1%, a praeodímiumé pedig 0,1–0,2% [14]. Noha ezek az adatok első ránézésre szerénynek tűnhetnek, már ebben az állapotban is elérik vagy meghaladják számos bányászott érc fémtartalmát. A valódi technológiai előny azonban a fizikai szeparáció után mutatkozik meg: a kinyert tiszta NdFeB mágneskoncentrátumban a neodímium koncentrációja már 25–30%, a praeodímiumé pedig 3–5%, ami nagyságrendekkel tisztább és dúsabb kiindulási alapot szolgáltat a hidrometallurgiai feldolgozáshoz, mint bármilyen természetes lelőhely.

2.2. Ritkaföldfémek visszanyerése HDD-k hulladékából

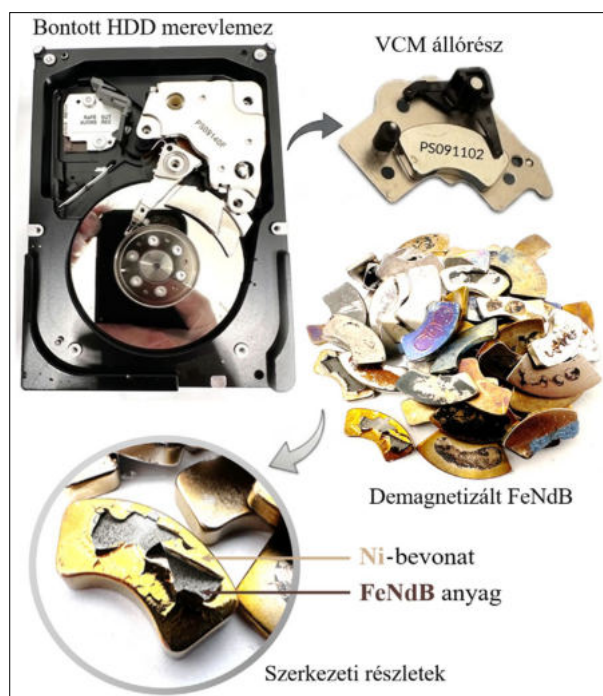
A kézi vagy gépi úton kiserelt mágneseket első lépésben demagnetizálják (ez jellemzően a Curie-pont feletti hőmérsékleten, 310–350 °C-on történik). Ezt követi az aprítás és az őrlés a megfelelő szemcseméret elérése érdekében. A fizikai-mechanikai előkészítő fázist a kohászati feldolgozás követi, amely leggyakrabban egy teljes oxidáló pörköléssel indul. Ennek során a porított anyagot 800–1000 °C-on, levegőatmoszférában hevítik, így a fémes állapotú Fe–Nd ötvözet Fe_2O_3 -dá és Nd_2O_3 -dá alakul. A módszer fő előnye, hogy míg a Fe_2O_3 híg savakban szinte alig oldódik, addig az Nd_2O_3 már gyengén savas oldattal (pH ~1–5) is könnyen oldatba vihető. Az eljárás komoly hátránya azonban a komplex oxidok (pl. $FeNdO_4$) képződése [15]. Ezek a vegyületek ugyanis csak olyan erősen savas környezetben tárhatók fel, amely már a vas-oxidot is oldatba viszi, aminek következtében a neodímium-tartalom jelentős része elvész, vagy a későbbi elválasztás válik nehézkessé. A kioldást követően az oldat tisztítására és a ritkaföldfémek kinyerésére gyakran oxalátos precipitációt vagy timsóként történő kicsapást alkalmaznak. Az irodalomban vizsgálták a különféle sóoldadékokban végzett Nd-eltávolítást is, amelynek eredményeként vasszivacs és Nd-só termékek képződnek [3]. Egy másik lehetséges út a Fe–Nd mágnesek közvetlen kohósítása, amely során vasolvadék és egy ritkaföldfém-oxidokban dús salak keletkezik. Ezek az eljárások azonban meglehetősen energia- és vegyszerigényesek, így ipari méretű alkalmazásuk korlátozott, ami indokolja az új, alternatív irányok kutatását.

A cikk egy olyan új technológia fejlesztését célzó vizsgálatokat ismertet, amely lehetővé teszi a hulladékmágnesekből származó ritkaföldfémek ázsiai finomítóktól független, a mágnesgyártás számára közvetlenül hasznosítható visszanyerését.

3. A kísérleti eljárás leírása

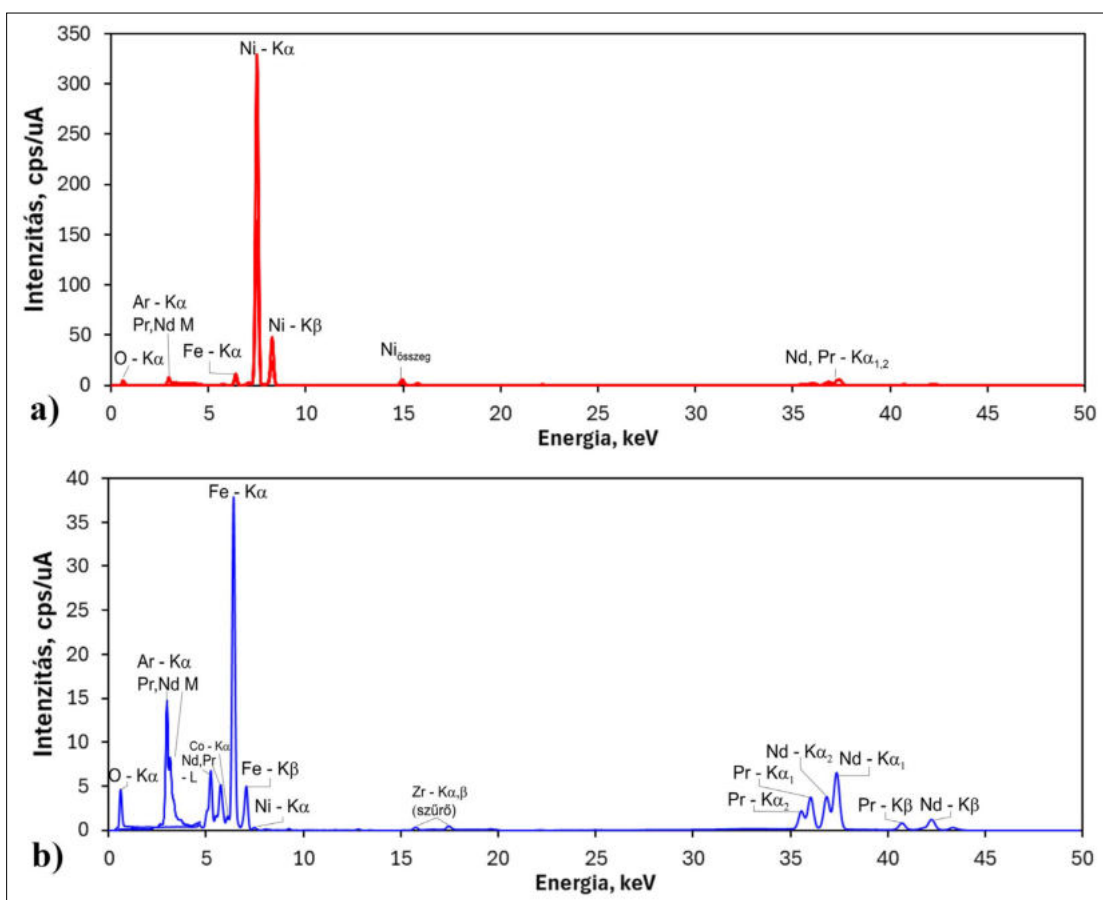
A fizikai előkészítést (kiserelés, demagnetizálás, majd őrlés) követően az NdFeB mágnespor hidro-

metallurgiai feltárását sósavval végeztük 80 °C-os hőmérsékleten. A kioldási folyamatot oly módon szabályoztuk, hogy az oldat pH-ja a reakció végére a 4–5 közötti tartományba essen. A precipitációs kísérleteket üveg főzőpoharakban hajtottuk végre. A reagens zagy adagolását perisztaltikus pumpával biztosítottuk az oldatba. A rendszer hőmérsékletét fűtőlap segítségével állandó 85 °C-on tartottuk, míg a pH-érték folyamatos monitorozását egy zselés, kettős sóhidas pH-elektrodával felszerelt Orion Star A111 típusú pH-mérőműszerrel végeztük. Az analitikai méréseket és a fémkoncentrációk meghatározását egy Rigaku NEX QC asztali energiadisperzív röntgenfluoreszcencia (EDXRF) spektrométerrel, valamint egy PinAAcle 900 típusú atomabszorpciós spektrométerrel hajtottuk végre. Az elválasztástechnikai vizsgálatok során a dinamikus kromatográfiás oszlopteszteket egy 120 cm hosszúságú és 15 mm belső átmérőjű üveg-oszlopban végeztük, amelybe az oldat feladása szintén perisztaltikus pumpával történt. A statikus egyensúlyi vizsgálatok során 10 cm³ térfogatú ioncserélő gyantát (Lewatit TP 207) kontaktáltattunk 20 cm³ térfogatú, 1000 ppm fémion-koncentrációjú oldattal. A 3 órás kontaktidőt követően meghatároztuk a belépő és a kilépő oldatok fémkoncentrációját. A termodinamikai számításokhoz a HSC Chemistry 10 szoftvert alkalmaztuk. Az oldatfázisú speciációs modellezése-



1. ábra. A HDD meghajtókából kisserelt – demagnetizált – FeNdB anyag makrofotója

ket a HEKKA (Hidro-elektrometallurgiai Egyensúlyi és Komplexképződési Kalkulátor Algoritmus) elnevezésű, Excel-alapú programmal végeztük el, amelynek



2. ábra. A bevonatos (a) és bevonatmentes mágnesek (b) EDXRF-spektrumai

számítási algoritmusai Kékesi és munkatársai által publikált egyenletsorozatokon alapul [16].

4. Eredmények és kiértékelésük

A bemutatott kémiai-metallurgiai eljárás elsődleges célkitűzése nem az egyedi, nagy tisztaságú ritkaföld-fémek előállítása, hanem a mágnesgyártási folyamatba közvetlenül visszatáplálható prekursor anyag, az úgynevezett didímium (Nd-Pr elegy) kinyerése. Ez a technológiai megközelítés energetikai szempontból szignifikánsan hatékonyabb, mivel kiküszöböli a neodímium és a praeodímium egymástól való szétválasztásának rendkívül energia- és vegyszerigényes fázisait.

4.1. Anyagvizsgálat

A hulladékaramból manuális szétszereléssel kinyert mágnesek az 1. ábrán láthatóak. A termikus demagnetizálást követően a nikkelt védőbevonat több esetben delaminálódott a mágnesek felületéről. Ez a jelenség lehetőséget biztosított a bevonat, valamint az NdFeB alapmátrix anyagszerkezeti jellemzőinek elkülönített vizsgálatára.

A mágnes szinterelt – porkohászati úton előállított – tömbi fázisa kifejezetten rideg viselkedést mutat, ami lehetővé tette a minta hatékony aprítását 2 mm-es résméretű pofás törő alkalmazásával. A levált védőbevonat, valamint az NdFeB alapanyag karakterisztikus XRF-spektrumait a 2. ábra szemlélteti.

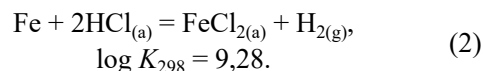
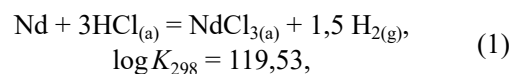
Megfigyelhető, hogy a védőbevonat jelentős vas-tagsága számottevő abszorpciós gátat képez a röntgensugárzás számára. Noha a bevonat alatti NdFeB mátrix gerjesztése kismértékben a rétegen keresztül is végbemegy, az alapanyag karakterisztikus csúcsai intenzitásukban messze elmaradnak a nikkelt domináns jele mellett. Ezzel szemben a bevonatmentes fázis spektrumában a vas egyértelmű dominanciája mellett a neodímium és a praeodímium jelenléte meghatározó. Kísérőelemként, illetve szennyezőként kobalt, nikkelt, mangán, valamint nyomokban molibdén azo-

nosítható. A részletes kvantitatív elemzés eredményeit az 1. táblázat foglalja össze.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a vizsgált mágnesek jelentős koncentrációban tartalmaznak kritikus fémeket, elsősorban neodímiumot, praeodímiumot és kisebb mennyiségben diszpróziut. Noha a kísérőelemként jelenlévő kobalt és nikkelt gazdasági értéke alacsonyabb, kinyerésük technológiai szempontból szintén releváns lehet. A folyamat legfőbb kohászati kihívása a nagy mennyiségű vas szelektív eltávolítása, amely speciális metallurgiai eljárásokat igényel. A szakirodalomban vizsgált egyik lehetséges útvonal a vas szelektív oxidációja, melynek célja a vas nehezen oldható Fe_2O_3 -fázisba vitele, miközben a képződő Nd_2O_3 híg savas közegben is jól szolubilizálható marad. Ezen eljárás kritikus hátránya azonban, hogy az oxidok közötti szilárd fázisú reakciók során komplex perovszkit típusú oxidok – pl. NdFeO_3 – keletkezhetnek. Ez a fázis a hematithoz hasonlóan nehezen oldható, így képződése jelentős neodímiumvesztést okoz. Tekintettel a ritkaföldfémek magas egységárára és stratégiai jelentőségére, az ilyen mértékű hozamcsökkenés technológiai szempontból nem megengedhető.

4.2. Termodinamikai tervezés

Az örölt NdFeB mágnesporból történő hidrometallurgiai fémkinyerés első lépése a lúgzás, amely során oldatba visszük az értékes alkotókat. A sósavas közeg alkalmazása hatékony megoldás a kénsavas feltárással szemben, nemcsak kinetikailag kedvezőbb, hanem jelentős technológiai előnyöket is hordoz, mint például az oldószer termikus regenerálhatósága és a végtermékek szulfátszennyeződéstől való mentessége. Érdekes kiemelni, hogy a mágnesek börtartalma a sósavas feltárással borsav (H_3BO_3) formájában oldódik ki, majd a tisztítási lépések teljes sora alatt stabilan az oldatfázisban marad. A neodímium és a vas sósavas közegben végbemenő lúgzása az alábbi reakciókkal és termodinamikai paraméterekkel jellemezhető:

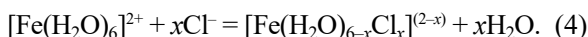
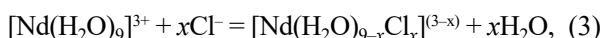


A neodímium rendkívül nagy reakciókészségét az extrém magas egyensúlyi állandó igazolja, amely a folyamat elentős termodinamikai hajtóerejét mutatja, indikálva a folyamat gyakorlatilag teljes végbemenetét. Ez a reaktivitás szoros korrelációban áll a fém erősen negatív standard elektródpotenciáljával ($-2,37 \text{ V}$), ami elméletileg a víz spontán bontását is lehetővé teszi. Noha a vas oldódását leíró egyensúlyi

1. táblázat. Az FeNdB mágnesfrakcióból kivett reprezentatív minta elemanalízise

Elem	Koncentráció, %
Fe	68,00
Nd	20,80
Pr	6,11
Dy	1,12
Co	0,85
Ni	2,34
Mo	0,02
Mn	0,70

állandó a neodímiuméhoz képest több nagyságrenddel alacsonyabb, a sósavas közegben tapasztalható termodinamikai hajtóerő továbbra is jelentős, biztosítva a fémes fázis hatékony és gyors átalakulását kloridos oldattá. A kloridos közegben kialakuló klorokomplexek az akvokomplexek aktivitásának csökkentése révén érdemben járulnak hozzá a lúgzási folyamatok hatékonyságához. A ligandumcsere-reakciók során a kloridionok fokozatosan kiszorítják a vízmolekulákat a fémionok koordinációs szférájából az alábbi általános egyenletek szerint:

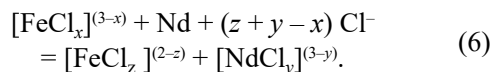
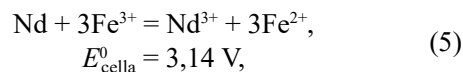


A lantanoidaionok kifejezetten „kemény” Lewis-savaknak tekintendők, amelyekre kiemelkedően nagy hidratációs entalpia jellemző [17]. Ez az erős affinitás a vízmolekulák felé rendkívül stabilis akvakomplexek kialakulásához vezet, a neodímium esetében például a kilences koordinációjú nonaakvakomplex ($[\text{Nd}(\text{H}_2\text{O})_9]^{3+}$) a meghatározó, amely trikoronázott trigonális prizma geometriát vesz fel [18]. Az ionszféra stabilis hidratáltsága miatt híg sósavas közegben a kloridionok elsősorban külső szférás komplexeket, azaz elektrosztatikus ionpárokat alkotnak. Valódi, belső szférás koordinációs kapcsolatok kialakulása csak magas kloridkoncentráció vagy tömény sósavas közeg mellett következik be, ahol a ligandumcsere energetikailag lehetővé teszi a vízmolekulák részleges szubsztitúcióját a koordinációs szférában.

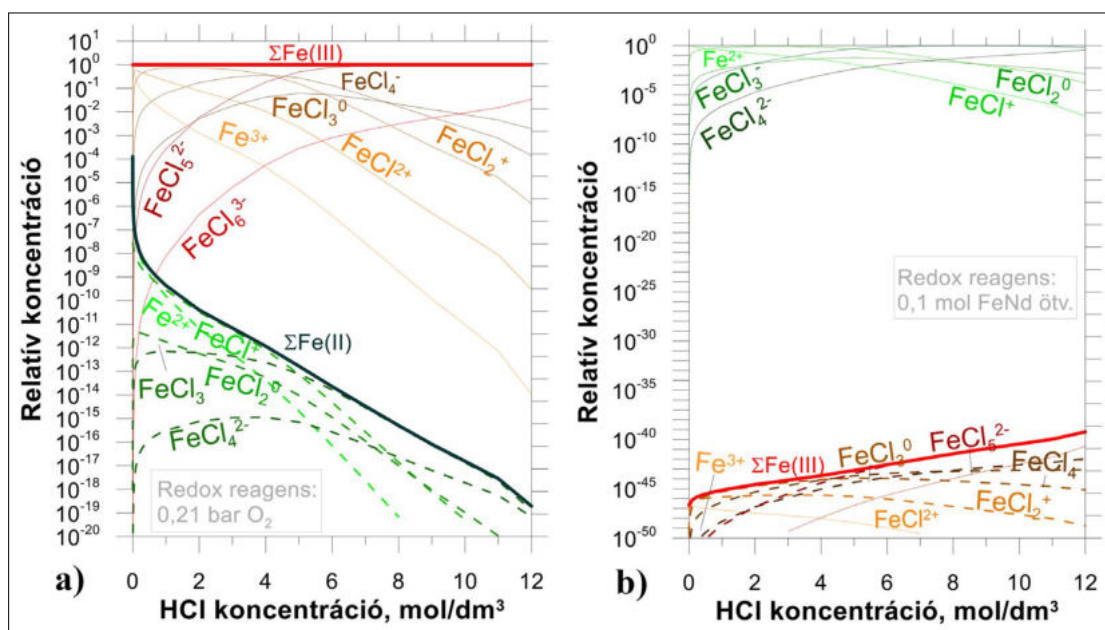
Ezzel szemben a vas(II)- és vas(III)-ionok stabilis belső szférás klorokomplexek kialakítására hajlamosak, melyek speciációja a rendszer kloridion-aktivitásától és a fennálló redoxviszonyoktól függ. Tekin-

tettel arra, hogy a vas oxidációs állapota alapvetően meghatározza a szeparáció hatékonyságát – különös tekintettel a negatív töltésű klorokomplexek képződésére –, a fém elektrokémiai viselkedésének feltérképezése elengedhetetlen. A vasionok oxidációs állapotok és komplexformák szerinti megoszlását – oxidatív (levegőztetett), illetve redukzív (fémes FeNd-porral egyensúlyban) környezetben – a 3. ábra szemlélteti.

A Fe(II)-ionok szignifikánsan alacsonyabb stabilitású klorokomplexeket képeznek, mint a Fe(III)-formák. A termodinamikai modellezés rávilágít, hogy míg atmoszférikus oxigénnel tartott egyensúly esetén a Fe(III) dominanciája érvényesül, addig fémes vas jelenlétében a Fe(II) válik meghatározóvá. Ebből adódóan a mágnesek sósavas kioldása során keletkező oldatban a vas elsődlegesen FeCl_2 formájában van jelen. Ezt a redukzív állapotot tovább erősíti a rendszerben lévő neodímium, amely a vasnál nagyságrendekkel negatívabb standard potenciálja révén hatékony redukálószerként viselkedik, biztosítva a Fe(II)-es oxidációs állapotát az alábbi reakció szerint:

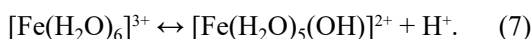


Ez a termodinamikai kényszer garantálja, hogy a kioldási folyamat alatt, amíg fémes komponens van jelen, a vas oxidációja Fe(III)-fázisig nem megy végbe, ami alapvetően meghatározza a későbbi szeparációs lépések (például a szelektív precipitáció vagy az ioncsere) technológiai paramétereit. Nagy tömegű vas oldatból történő eltávolítására az ipari gyakorlatban elsősorban a precipitációs technikák terjedtek el. A

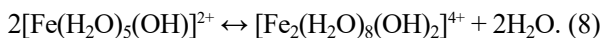


3. ábra. A vas-kloro ionjainak megoszlása levegővel (a) és fémes vassal (b) való egyensúlyban

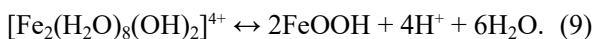
hagyományos vas(III)-hidroxid leválasztása azonban kedvezőtlen, mivel az amorf, géles szerkezetű csapadék nehezen szűrhető, és a jelentős mennyiségű anyag (és ezáltal az értékes fémek) mechanikai bezáródása miatt komoly veszteségeket okoz [19]. Emiatt a hidrometallurgiában preferáltak a szabályozott fázisú kristályos precipitációs eljárások, úgymint a jarozit-, a goethit-, és a hematit-eljárás [20, 21]. Tekintve, hogy a jarozitképződés veszélyes hulladéknak minősülő mellékterméket eredményez, a hematit leválasztása pedig költségigényes nagynyomású – autokláv – technológiát követel meg, a jelen kutatásban a goethitprecipitáció bizonyult a leginkább kézenfekvő megoldásnak. A goethit kialakulásának mechanizmusa egy többlépcsős kondenzációs folyamat. Első lépése a vas(III)-akva-komplexek hidrolízise:



Ezt követi a hidrolizált monomerek vízkilépéssel járó összekapcsolódása, melynek során kettős hidroxidhiddal kötött dimerek, majd polimerek jönnek létre:



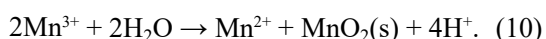
A folyamat utolsó lépése során a hidroxidhidak oxidhidakká alakulnak, kialakítva a kristályos goethit-magvait:



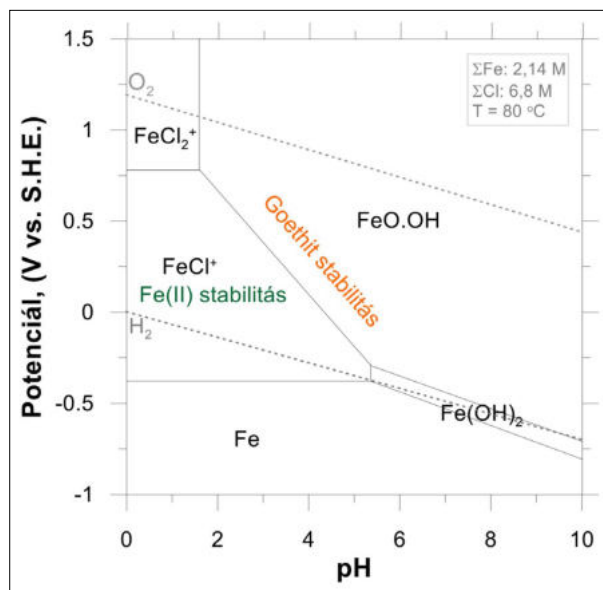
A képződő csapadék kiváló kristályos morfológiával rendelkezik, minimális a víztartalma, és kiváló szűrhetősége révén drasztikusan minimalizálja az értékes ritkaföldfémek koprecipitációjából vagy mechanikai bezáródásból eredő veszteségét. A vizes kloridos rendszerre vonatkozó 80 °C-ra számított Pourbaix-diagramot a 4. ábra szemlélteti. A vas szelektív eltávolítását célzó precipitációt a 3,5–4,0 pH-tartományban célszerű kivitelezni, ez az intervallum biztosítja a vas goethit fázisban történő leválását, miközben hatékonyan gátolja a ritkaföldfémek koprecipitációját. Oxidálószerként a környezeti levegő oxigéntartalma – atmoszférikus nyomáson is – megfelelőnek bizonyulhat. A levegőztetés alkalmazása mellett a folyamat kinetikája kontrollált marad, ami elősegíti a jó minőségű, kiválóan szűrhető csapadék képződését.

A vassal megegyező módon a mangán, a kobalt és a nikkel leválasztására is hatékony megoldást nyújthat a pH-emeléssel egybekötött hidroxidos precipitáció. Ezt az összefüggést jól szemlélteti az 5. ábrán bemutatott egyensúlyi ionaktivitási diagram.

A mangán esetében a Mn(III) oxidációs állapot termodinamikailag nem stabil, és az alábbi diszproporciós reakció során elbomlik:

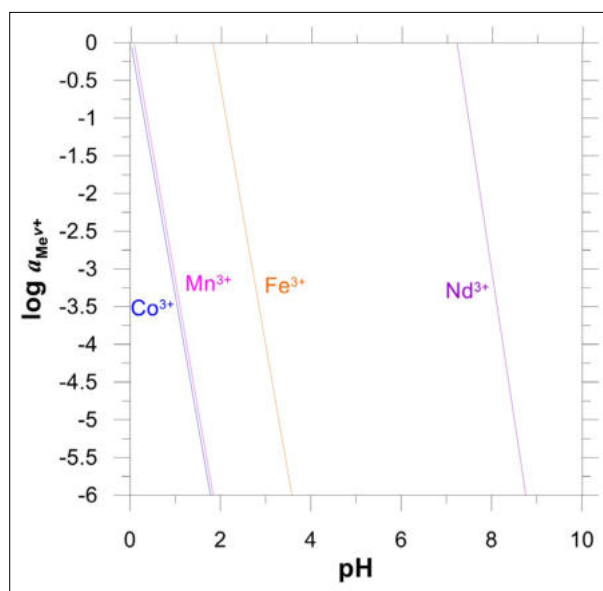


Mivel a képződő MnO_2 egységnyi aktivitású szilárd fázis, a reakció folyamatosan – a termékképződés irányába eltolódva – végbe tud menni. A folyamat



4. ábra. Vas–klór–víz rendszer potenciál–pH (Pourbaix-) diagram

tervezésénél kulcsfontosságú megvizsgálni, hogy milyen magas oxidációs potenciál szükséges a Co(III), Ni(III), Mn(IV) állapotok stabilizálásához. Mivel a rendszerben a nikkel van jelen a legnagyobb mennyiségű szennyezőként, a technológiai paramétereket



5. ábra. A fémionok (Co^{3+} , Mn^{3+} , Fe^{3+} , Nd^{3+}) egyensúlyi aktivitásának logaritmusa a pH függvényében, 80 °C-on

célszerű erre a fémre optimalizálni. A Ni(III)/Ni(II) rendszer redoxipotenciálját 25 °C-on a következő egyenlet írja le:

$$E = E^0 + 0,0591 \cdot \log(a_{\text{Ni}^{3+}}/a_{\text{Ni}^{2+}}) \quad (11)$$

A vízbontás termodinamikai potenciálja a Nernst-egyenlet értelmében szintén függ a pH-tól:

$$E(\text{O}_2) = 1,23 - 0,0591 \text{ pH}. \quad (12)$$

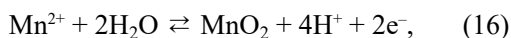
Erősen savas, pH = 0 értékű közegben a víz oxidációjának termodinamikai határpotenciálja a (12) egyenlet alapján 1,23 V. Ezt a határfeszültséget a nikkelreakció egyensúlyi potenciáljával egyenlővé téve kiszámítható a Ni^{3+} -ionok maximális – kritikus – aktivitása:

$$1,23 = 2,1 + 0,0591 \cdot \log a_{\text{Ni}^{3+}}, \quad (13)$$

$$-0,87 = 0,0591 \cdot \log a_{\text{Ni}^{3+}}, \quad (14)$$

$$\log a_{\text{Ni}^{3+}} = (-0,87/0,0591) \approx -14,7. \quad (15)$$

A számítások alapján erősen savas (pH = 0) közegben a maximális Ni(III)-aktivitás mindössze $2 \cdot 10^{-15} \text{ mol/dm}^3$. Noha ez már önmagában is ultranyomnyi mennyiségnek számít, a pH emelésével – a fémion háromszoros töltése miatt – az oldhatóság drasztikusan tovább csökken. Következésképpen, amennyiben megfelelő mértékű oxidációs potenciál biztosítható, a vizsgált szennyezők kiemelkedő hatásfokkal távolíthatók el az oldatból. Míg a vas oxidációja viszonylag könnyen végbemegy, a többi fém lényegesen nehezebben oxidálható. A vizsgált szennyezők oxidatív precipitációja az alábbi főbb félreakciók szerint megy végbe:



Mivel a reakciók közül a nikkelt oxidációja igényli a legnagyobb potenciált, a gyakorlatban ez tekinthető a technológiát limitáló tényezőnek. Éppen ezért a megfelelő oxidálószer kiválasztásához a nikkelt viselkedése a mérvadó. Az ehhez szükséges egyensúlyi redoxipotenciál a Nernst-egyenlet alapján – a nikkelt példáján szemléltetve – az alábbi módon számítható:

$$E = E^0 + (0,0591/1) \cdot \log([\text{H}^+]^3/[\text{Ni}^{2+}]), \quad (19)$$

$$E = E^0 - 0,0591 \cdot 3 \text{ pH}, \quad (20)$$

$$E = 2,30 - 0,177 \text{ pH}. \quad (21)$$

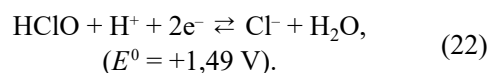
A 2. táblázat az oxid, illetve hidroxid formában történő leválasztás szempontjából kritikus redoxipotenciál értékeket foglalja össze.

A kísérletek során alkalmazott kalcium-hipoklorit oxidálószer aktív komponensének termodinamikai viselkedését szintén figyelembe kell venni. A vizsgált savas és enyhén savas közegben (pH < 7,5) a reagens dominánsan hipoklórossav (HClO) formájában van

2. táblázat. A Mn, Co és Ni oxidatív precipitációja szempontjából releváns redoxipotenciálok

pH-érték	$\text{Mn}^{2+}/\text{MnO}_2$ (V)	$\text{Co}^{2+}/\text{Co}(\text{OH})_3$ (V)	$\text{Ni}^{2+}/\text{NiOOH}$ (V)
0	1,53	1,82	2,30
1	1,41	1,64	2,12
2	1,29	1,46	1,95
3	1,17	1,29	1,77
4	1,05	1,11	1,59
5	0,93	0,97	1,41
6	0,62	0,75	1,24

jelen. A vonatkozó oxidációs félreakció és annak standard redoxipotenciálja az alábbiak szerint írható fel:



A rendszer egyensúlyi redoxipotenciáljának pH-függését a Nernst-egyenlet írja le:

$$E_{\text{HClO}/\text{Cl}^-} = E^0 + (0,0591/2) \cdot \log([\text{HClO}][\text{H}^+]/[\text{Cl}^-]) \quad (23)$$

$$E_{\text{HClO}/\text{Cl}^-} = 1,49 - 0,0295 \text{ pH} + 0,0295 \cdot \log([\text{HClO}][\text{H}^+]/[\text{Cl}^-]) \quad (24)$$

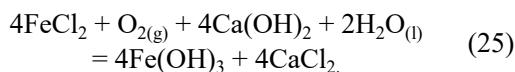
Az egyenletből látható, hogy a hipokloritalapú reagens oxidálóereje a pH növekedésével – a fémek oxidatív precipitációjához hasonlóan – lineárisan csökken. Ugyanakkor az oxidálószer koncentrációjának megfelelő – sztöchiometrikus felesleget biztosító – megválasztásával a potenciál elegendően magas tartható a 2. táblázatban meghatározott kritikus értékek eléréséhez, különösen a magasabb pH-tartományokban, ahol a víz bomlásának kinetikai gátja [22] is kedvez a fémek szelektív oxidációjának.

Noha a termodinamikai feltételek megfelelő reagensadagolással biztosíthatók, a precipitáció előrehaladtával a fémionok koncentrációjának csökkenése miatt a maradéktalan eltávolítás aránytalanul nagy oxidálószer-felesleget igényelne. Ezért technológiai szempontból az a legcélszerűbb megközelítés, ha a precipitációs eljárással csak a szennyezők zömét csapjuk le, a maradék, nyomnyi mennyiségű szennyező eltávolítására pedig valamilyen ioncserén alapuló technikát alkalmazunk. Ez a kombinált módszer garantálja a lantanoidák magas kihozatalát, miközben az oxidálószer-felhasználás is optimális marad. Kloridos rendszerek alkalmazása esetén az oxidációhoz kifejezetten célszerű hipokloritalapú reagenset használni.

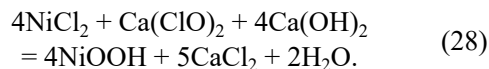
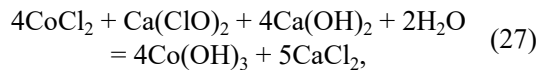
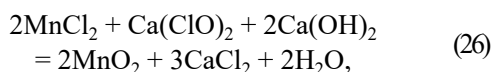
4.3. Oldattisztítás precipitációs eljárással

A sósavas kioldást követően kapott kloridos anyaat egy komplex, multikomponensű rendszer. Ebből a célelemek (Nd, Pr, Dy) szelektív kinyerése előtt elen-

gedhetetlen a nagy mennyiségű vas, valamint a kisebb koncentrációban jelen lévő kísérőelemek (Co, Ni, Mn) eltávolítása. A durva oldattisztítás hatékony, iparilag is jól skálázható módszere a szelektív, szabályozott pH-jú oxidatív precipitáció. Ennek a szakasznak az elsődleges célja a fő mátrixszennyezőnek számító vas teljes elkülönítése, valamint a kísérő fémek koncentrációjának részleges csökkentése az oldatfázisban. A termodinamikai modellezés rámutatott, hogy a sósavas feltárást követően a vas dominánsan Fe(II) oxidációs állapotban van jelen az oldatban. A vas(II)-ionok hidroxid formájában történő kicsapása azonban csak olyan magasabb pH-tartományban menne végbe, amikor a ritkaföldfémek koprecipitációja már jelentős hozamvesztést okozna. Emiatt biztosítani kell a Fe(III) oxidációs forma dominanciáját, amely már híg savas közegben is rendkívül stabil, és rosszul oldódó hidroxid csapadékot képez. A folyamat során a felszabaduló sav semlegesítésére és a pH folyamatos szabályozására kalcium-hidroxidot adagolunk. A levegőbefúvásos oxidáció és a semlegesítés bruttó reakcióegyenlete az alábbi:



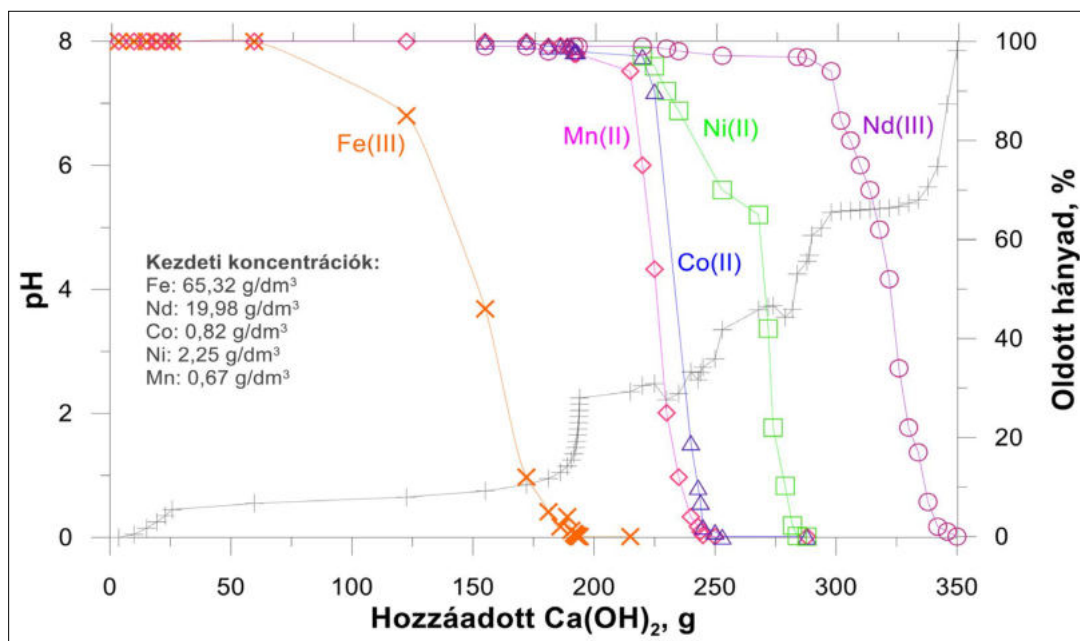
A vas eltávolítását követően a rendszerben lévő kisebb koncentrációjú kísérőelemek részleges oxidatív precipitációját kalcium-hipoklorit Ca(ClO)_2 adagolásával hajtottuk végre, az alábbi elvi reakcióegyenletek szerint:



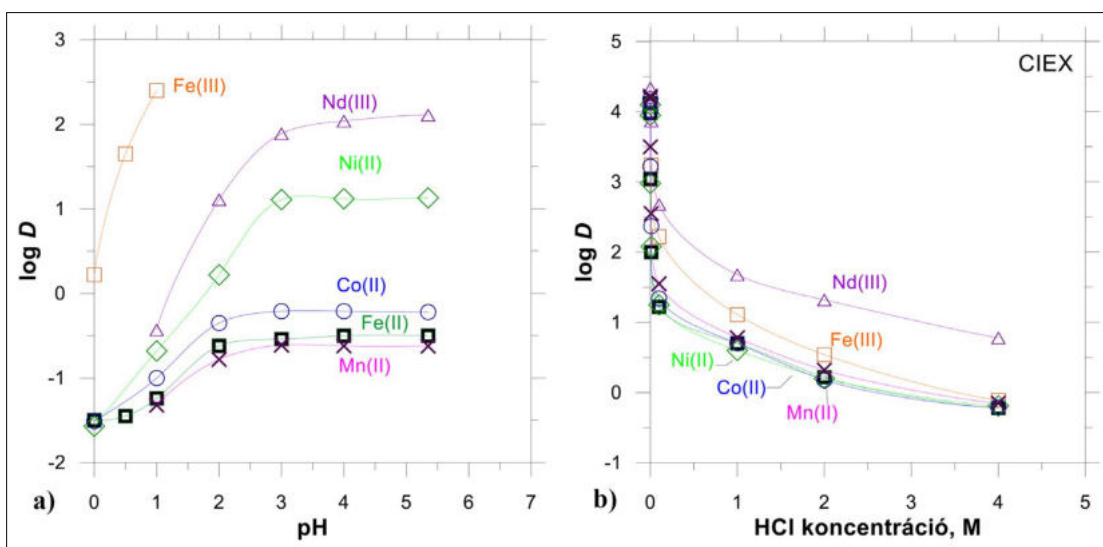
A precipitációs eljárás eredményei láthatók az 6. ábrán. A grafikon x tengelye kizárólag a semlegesítéshez felhasznált Ca(OH)_2 tömegét mutatja. Az oxidációszerként szolgáló kalcium-hipoklorit adagolása a szennyező fémek (Mn, Co, Ni) leválási pH-tartományában, azokkal párhuzamosan történt.

A kísérleti eredmények rámutatnak, hogy a vizsgált fémionok kicsapódási tartományai részben átfedést mutatnak. Ennek ellenére a reakciókörülmények optimalizálásával az előtisztítási szakasz hatékonysága jelentős. A vas mint fő szennyező eltávolítása mellett a kalcium-hipokloritos kezelés révén a kísérőelemek döntő hányada is a szilárd fázisba került: a leválasztás hatásfoka a mangán esetében 99,75%, a kobaltnál 98,11%, a nikkelnél pedig 96,76% volt. A precipitációs folyamatot kísérő neodímiumvesztés mintegy 3%-ra korlátozódott. A technológiai paraméterek alapján a szilárd–folyadék fázisok szétválasztását pH = 5 értéknél, megközelítőleg 285 g mészhidrát adagolását követően a legcélszerűbb végrehajtani.

A csapadékok szűrése után a folyamat következő műveletéhez továbbkerülő multikomponensű oldatban a célelemek – a neodímium, praeodímium és diszprózium – teljes mennyisége mellett a hidrometallurgiai úton nem teljeskörűen leválasztott, maradék mangán-, kobalt- és nikkellionok vannak jelen. Mivel a mágnesgyártásra alkalmas prekursorok előállításához elengedhetetlen a maradék kísérőelemek



6. ábra. A NdFeB mágnes sósavas oldatának kombinált oxidatív-hidrolitikus precipitációval történő tisztítása (80 °C, 350 rpm)



7. ábra. A releváns fémionok egyensúlyi ioncserés megoszlási függvényei: (a) kelátképző ioncsere és (b) kationcsere

nyommentes eltávolítása, az oldat finomtisztítására egy precízebb, szelektív ioncserés elválasztási eljárást találtunk szükségesnek.

4.4. Oldattisztítás kelátképző kationcserével

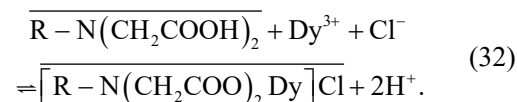
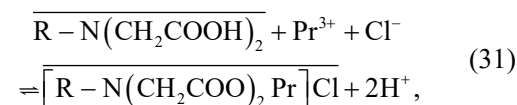
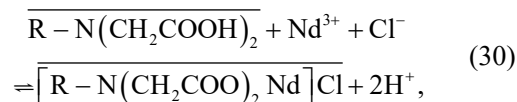
Alapvetően két megközelítést vizsgáltunk: i) kationcsere és ii) kelátképző ioncsere. A két különböző megközelítés összehasonlításának legcélravezetőbb módja az ioncserés egyensúlyi megoszlási hányadosok kísérleti úton történő meghatározása. A megoszlási hányados a kísérleti eredmények alapján közvetlenül számítható az alábbi összefüggés alapján:

$$D = c_{\text{gy}}/c_e = [V(c_k - c_e)/V_{\text{gy}}]/c_e, \quad (29)$$

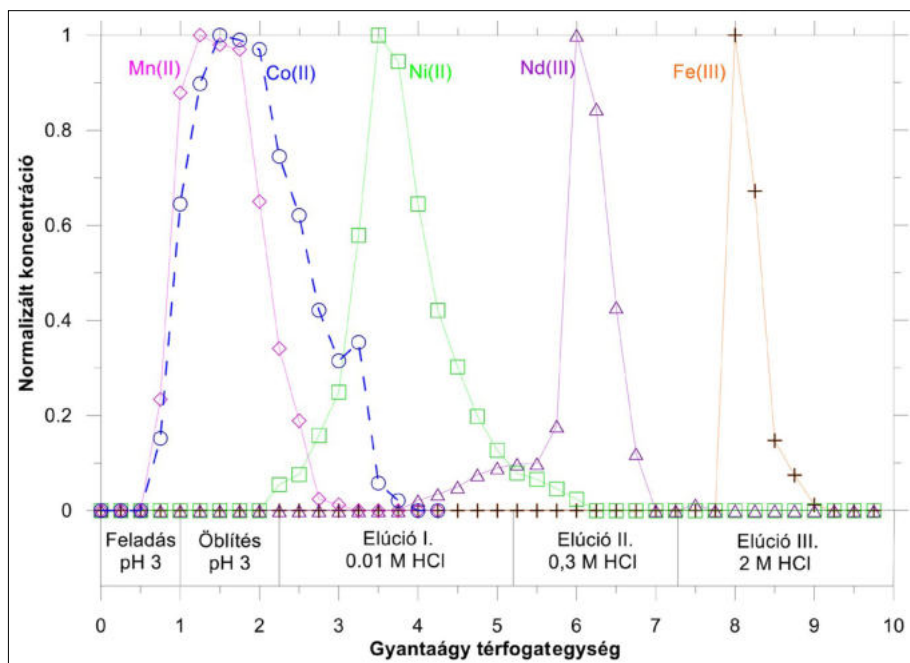
ahol c_k és c_e a vizsgált elem kezdeti, illetve egyensúlyi koncentrációja a vizes fázisban, míg a gyantafázis egyensúlyi koncentrációját c_{gy} fejezi ki. Az oldat térfogatát V , a gyanta térfogatát pedig V_{gy} jelöli.

Az eredményeket a 7. ábra mutatja. A mérési eredmények alapján megállapítható, hogy a hagyományos kationcserélő gyanta (Dowex 50WX8) nem mutatott kielégítő szelektivitást a multikomponensű rendszerben, mivel a fémionok kötődési affinitása a tiszta elektrosztatikus vonzóerőkön alapul. Ezzel szemben az IDA típusú kelátképző gyantával (Lewatit TP 207) kimért megoszlási függvények szignifikánsan kedvezőbb eredményt hoztak. A kelátképző gyanta esetében a ritkaföldfémek és a kísérő szennyezőelemek megoszlási görbéi között lényegesen nagyobb különbség mutatkozott a kritikus pH-tartományokban. Ez a markáns eltérés az IDA-funkciós csoportok koordinatív kötési mechanizmusának köszönhető, amely az átmenetifémekkel és a lantanoidaionokkal eltérő stabilitású kelátkomplexekeket képez. Az iminodiacetát- (IDA-) funkciós csoporttal rendelkező kelátképző ioncserélő műgyanták (ahol az $\bar{R}$ a szilárd polimermátrixot jelöli)

lantanoidakkal lejátszódó reakcióit az alábbi egyenletek írják le:



Mivel a kelátképző gyanta lényegesen élesebb kromatográfiás frontokat és nagyobb szelektivitást biztosít az átmenetifémekkel szemben, a hagyományos kationcserélő eljárások alkalmazását elvetettük. Noha a kelátképző ioncsere kiválóan alkalmas a ritkaföldfémek és az átmenetifémek kvantitatív elválasztására, a lantanoidák egymás közötti frakcionálására nem ad lehetőséget. Például pH = 3-as közegben a praeodímium megoszlási hányadosa mindössze 0,2 egységgel kisebb, míg a diszpróziumé 0,5 egységgel nagyobb a neodímiuménál. Ez a csekély termodinamikai különbség azt eredményezi, hogy a vizsgált ritkaföldfémionok (Nd, Pr, Dy) a gyantaágyban gyakorlatilag együtt mozognak, így az elúció folyamata során egymástól nem választhatók el kvantitatívan. A technológiai folyamat optimalizálását és a további, dinamikus oszlopos kísérleteket a következőkben kizárólag a kelátképző kationcserélő gyanta alkalmazásával folytattuk (8. ábra). A kiválasztott IDA-funkciós csoportú kelátképző gyantával végzett kromatográfiás kísérletek eredményei megerősítették a statikus vizsgálatok során tapasztalt szelektivitást, ugyanakkor rávilágítottak a folyamat finomhangolá-



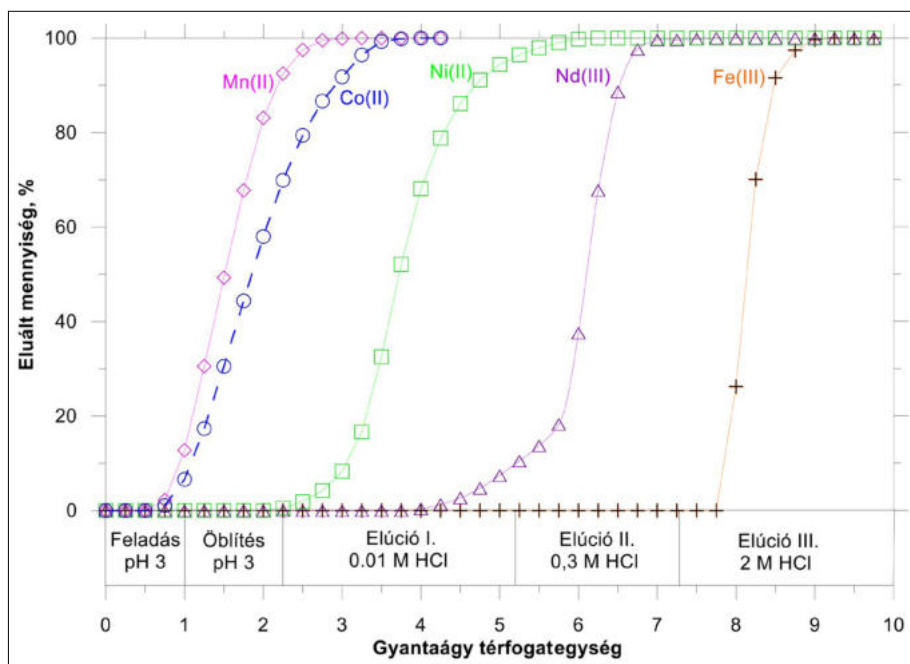
8. ábra. Az előtisztításon átesett oldat kelátképző ioncsérés elúciós görbéi (az áramoltási sebesség, 2 BV/h)

sának szükségességére is. Az elúciós görbék elemzése során a fémionok koncentrácioprofiljaiban jellegzetes kromatográfiás csúcsok rajzolódtak ki. Noha a komponensek többsége jól elkülöníthető frakciókban jelent meg, a csúcsok talpánál kismértékű átlapolódás figyelhető meg.

Ez a jelenség különösen a nikkelt Ni^{2+} és a neodímium Nd^{3+} elúciós zónáinak találkozásánál kritikus. Noha a precipitációs fázisban a koncentrációja csökkent, a gyantára kerülő oldatban maradt hányada a neodímiummal közel azonos tartományban eluálódik.

Az elúciós csúcsok alatti terület integrálásával megkapható a relatív kihozatal, ezt mutatja a 9. ábra. Amennyiben a cél egy teljesen tiszta, idegen fémektől mentes neodímiumtermék leválasztása, az elúciós görbék átlapolódása miatt komoly technológiai kompromisszumra kényszerülünk, amely két alternatív útvonalat vet fel.

Ha az elválasztás során a frakcionálási vágáspontot szigorúan a nikkelszűcs lefutása utánra jelöljük ki a nagy tisztaságú termék elérése érdekében, a neodímium egy része óhatatlanul a nikkellel dúszult frakcióba kerül. Ennek következtében a nagy tisztaságú



9. ábra. A kromatográfiás ioncsere relatív kihozatali görbéi

neodímium-végtermék hozama korlátozott; a kísérleti adatok alapján a teljes Nd-tartalomnak mindössze mintegy 80%-a nyerhető ki közvetlenül primer terméként. Ha viszont a technológiai cél a neodímium közel 100%-os visszanyerése, akkor a teljes elúciós térfogatot együttesen kell gyűjteni. Ekkor azonban a célelem elkerülhetetlenül szennyeződik a kísérő nikkellel, ami a prekursor anyag tisztaságának csökkenéséhez vezet.

A kapott elúciós profilok azonban egyértelműen bizonyítják, hogy a teljes neodímiummennyiség egyidejűleg magas tisztasággal és maximális kihozattalal történő, egylépcsős kinyeréséhez a kromatográfias rendszer paramétereit precízebben kell megválasztani. A szelektivitás növelése és az átlapolódások eliminálása érdekében a jövőbeni optimalizálás során a eluáló oldatok koncentrációjának lépcsős változtatása, valamint a hidrodinamikai viszonyok javítása – így az oldat áramlási sebességének pontosabb, finomabb megválasztása – jelenti a kulcsfontosságú technológiai fejlesztési irányt, amellyel valószínűsíthetően lehetővé válik az utólagos fémtisztítás nélkül is a tiszta Nd előállítása közel 100%-os kihozattalal.

4.5. A ritkaföldfémek kinyerése az ioncserélt oldatból

Az ioncserés elválasztás során az 5,5–7 BV (ágytérfogat) tartományban gyűjtött tisztított effluensből a ritkaföldfémek kinyerése oxalátos precipitációval történt. A lantanoidák maradéktalan kicsapása érdekében az oldathoz a sztöchiometrikus szükséglet 1,25-szörösének megfelelő mennyiségű oxálsavat adagoltunk. A levált csapadékot vákuumszűréssel elválasztottuk az oldattól, majd a szűrőn háromszori desztillált vizes mosással tisztítottuk. A fémoxalátok oxidokká történő termikus konverzióját platinatégelyben, levegő atmoszférában, 800 °C-on, 30 perces kalcinálással végeztük. A kalcinálást követően a termék tömegét lemértük, majd a mintát 900 °C-on további 15 percig izzítottuk, amit újabb tömegmérés követett. Mivel további tömegcsökkenést nem tapasztaltunk, megállapítható, hogy a végtermék kristályvizet, illetve oxalát-

vagy karbonmaradványt már nem tartalmazott. A keletkezett keverénoxid Nd-, Pr- és Dy-tartalmát EDXRF-spektrometriával határoztuk meg. A nyomnyi szennyezők (Ni, Fe, Co, Mn) koncentrációjának kvantitatív vizsgálatához a szilárd mintát sósavban feloldottuk, majd az oldatból láng-atomabszorpciós módszerrel analízist végeztünk. Az elemanalitikai vizsgálatok eredményeit a 3. táblázat mutatja be.

Az analitikai eredmények igazolják, hogy a kinyert anyag tisztasági foka a vizsgált elemek tekintetében magas: a végtermék több mint 99,9%-ban ritkaföldfém-oxidokból áll. Noha a klasszikus didímium-oxidra jellemző Nd/Pr arányt jól tükrözi, a diszpróziom jelenléte miatt az anyag csupán didímium-alapú keverénoxidnak tekintendő. A mintegy 4%-os Dy-tartalom nem idegen szennyezés, hanem a NdFeB mágnesek eredeti mátrixának – a koercitivitás növelése céljából alkalmazott nehéz ritkaföldfém-adaléknak – a velejárója, amely az oxalátos precipitáció során a didímiummal együtt kvantitatívan csapódott le. Az elemi összetételből és a kalcinálás során kialakuló termodinamikailag stabil fázisokból kiindulva a termék oxidformára vetített összetétele 73,70% Nd₂O₃, 22,41% Pr₆O₁₁ és 3,89% Dy₂O₃.

A szakirodalom alapján a kalcio-termikus redukcióba történő betápláláshoz és a közvetlen mágnesgyártáshoz a másodlagos ritkaföldfém-keverénoxidoknak szigorú technológiai feltételeket kell teljesíteniük. Elengedhetetlen az átmenetifém-szennyezők minimalizálása, a maradéktalanul kalcinált, nedvességmentes állapot, valamint a NdFeB rácsszerkezethez szükséges Nd, Pr és Dy megfelelő mátrixarányának megléte [23]. Az elért összetételi és tisztasági adatok alapján az előállított termék teljesíti ezeket a kritériumokat, így alkalmas a mágnesgyártás prekursor alapanyagaként történő felhasználásra [24].

5. Összefoglalás

A cikk egy új hidrometallurgiai eljárást mutat be, amelynek célja a ritkaföldfémek kinyerése a merevlemezekből származó neodímium-vas-bór mágnesekből, egy mágnesgyártásban közvetlenül újrahasznosítható prekursor anyag – didímiúmelegy – formájában.

A vizsgált demagnetizált mágnesek kiindulási összetétele 68,00% vas, 20,80% neodímium, 6,11% praeodímium és 1,12% diszpróziom volt, míg legfőbb szennyezőként 2,34% nikkelt jelen. A technológia a sósavas kioldást követően egy kétlépcsős, pH-szabályozott oxidatív precipitációs eljárást alkalmaz. A vas kristályos göethit formájában történő leválasztása után a kísérőelemek – a kobalt, a nikkelt és a mangán – kicsapása kalcium-hipoklorit adagolásával, pH 5-ös értéken történik. Ez a kombinált oxidatív-hidrolitikus módszer kiemelkedő tisztítási hatékonyságot mutatott: az oldatból a mangán 99,75%-át,

3. táblázat. A kinyert ritkaföldfém-keverénoxid elemi összetétele

Elem	Koncentráció, %	A kapott oxidos termék makrofotója
Nd	74,20	
Pr	21,78	
Dy	3,98	
Fe	<0,01	
Ni	0,04	
Mn	<0,01	
Co	<0,01	

a kobalt 98,11%-át és a nikkelt 96,76%-át sikerült eltávolítani, miközben a folyamat során fellépő neodímiumvesztés mindössze 3% maradt. A maradék szennyezők nyommentes eltávolítását iminodiacetát funkciós csoportú, kelátképző kationcserélő gyantával töltött kromatográfiás oszlopon végeztük. Az eredmények alapján, szigorú elválasztási vágáspont kijelölésével, a teljes neodímiumtartalom mintegy 80%-a nyerhető ki közvetlenül, nagy tisztaságú primer termékként. Az eredmények egyúttal rámutattak, hogy a közel 100%-os kihozatal eléréséhez az elúciós zónák – különösen a nikkelt és a neodímium esetében fellépő – átlapolódása miatt a hidrodinamikai viszonyok és az eluáló oldatok további kromatográfiás finomhangolása szükséges.

A megtisztított oldatból oxalátos precipitációval választottuk le a neodímiumot, a praeodímiumot és a diszpróziumot csapadék formájában, amelyet ezt követően 800 °C-on, levegő atmoszférában kalcináltunk stabil oxidokká. A kapott didímiumalapú keverék-oxid elemi összetétele 74,20% neodímium, 21,78% praeodímium és 3,98% diszprózium. Az elért tisztasági és összetételi paraméterek alapján ez a végtermék közvetlenül alkalmas lehet a mágnesgyártás prekursor alapanyagaként szolgálni.

Irodalom

- [1] K. Habib, K. Parajuly, H. Wenzel (2015): Tracking the flow of resources in electronic waste - The case of end-of-life computer hard disk drives. *Environmental Science & Technology*, 49(20), 12441–12449. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02264>
- [2] V. Forti: The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential. United Nations University (UNU) / UNITAR, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam.
- [3] K. Binnemans, P. T. Jones, B. Blanpain, et al. (2013): Recycling of rare earths: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, 51(1), 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037>
- [4] O. Gutfleisch, M. A. Willhard, E. Brück, et al. (2011): Magnetic materials and devices for the 21st century: Stronger, lighter, and more energy efficient. *Advanced Materials*, 23(7), 821–842. <https://doi.org/10.1002/adma.201002180>
- [5] G. Várhegyi, *Fémkohászat IV*, Budapest: Tankönyvkiadó, 1967.
- [6] S. Wickleder (2002): Physical Chemistry of Lanthanide Compounds," *Chemical Reviews*, 102(6), 2011–2008. <https://doi.org/10.1021/cr010308o>
- [7] R. Choppin (2007): The chemical behavior of the lanthanides and the actinides. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 273(3), 695–703. <https://doi.org/10.1007/s10967-007-0933-3>
- [8] F. Xie, T. Zhang, D. Dreisinger, et al. (2014): A critical review on solvent extraction of rare earths from aqueous solutions. *Minerals Engineering*, 56(1), 10–28. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.10.021>
- [9] M. Jha, A. Kumari, A. Panda, et al. (2016): Review on hydrometallurgical recovery of rare earth metals (REMs) from primary and secondary resources. *Hydrometallurgy*, 165, 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.01.035>
- [10] F. Habashi (2013): Extractive metallurgy of rare earths. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 52(3), 224–233. <https://doi.org/10.1179/1879139513Y.0000000081>
- [11] O. Takeda, H. Okabe, Y. Umetsu (2006): Recovery of neodymium from magnet scrap by utilizing magnesium as an extraction solvent. *Materials Transactions*, 47(3), 888–892.
- [12] I. B. Illés, T. Kékesi (2019): A magnézium és a titán előállítása. Miskolc: Miskolci Egyetemi Kiadó.
- [13] Z. Horváth, G. Pásztor (1984): *Vákuum-metallurgia*, Budapest: Műszaki Tankönyvkiadó.
- [14] A. Danczak, I. Chojnacka, S. Matuska, et al. (2018): The recycling-oriented material characterization of hard disk drives with special emphasis on NdFeB magnets. *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, 54(2), 363–376.
- [15] L. Ng Yong, H. E. Choo, A. Chiang, C. Ng (2025): Recovery of rare earth elements: A comprehensive review from the perspective of secondary sources and potentially greener leachants. *Separation and Purification Technology*, 382(1). <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.135752>
- [16] T. Kékesi, T. Török, M. Isshiki (2005): Anion exchange of chromium, molybdenum and tungsten species of various oxidation states, providing the basis for separation and purification in HCl solutions. *Hydrometallurgy*, 77(1), 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.10.012>
- [17] B. Mason, C. B. Moore (1982): *Principles of Geochemistry* (4th Edition). Toronto: John Wiley & Sons.
- [18] S. A. Cotton, P. R. Raithby (2017): Systematics and surprises in lanthanide coordination chemistry. *Coordination Chemistry Reviews*, 340, 220–231. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2017.01.011>
- [19] J. O. Claassen, R. F. Sandenbergh (2007): Influence of mixing on the quality of iron precipitates. *Hydrometallurgy*, 87(3–4), 112–123. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2007.02.002>
- [20] Z. Horváth (1987): *Fémkohászat III*. Budapest: Tankönyvkiadó.
- [21] B. Yang, G. Chen, et al. (2025): Separation of iron from ZnSO₄ solution by oxygen pressure enhanced hydrothermal precipitation. *The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science*, 64(1), 286–295. <https://doi.org/10.1080/00084433.2024.2354088>
- [22] T. Erdey-Grúz (1971): *Transzportfolyamatok vizes oldatokban*. Budapest: Akadémia Kiadó.
- [23] V. Hoogerstraete, A. Blanpain, B. Van den Bossche, K. Binnemans (2014): Recycling of NdFeB magnets using nitration, calcination and water leaching for REE recovery. *Green Chemistry*, 16(7), 3418–3424.
- [24] M. Őnal, E. Aktan, C. Blanpain, et al. (2017): Recycling of NdFeB magnets using nitration, calcination and water leaching for REE recovery. *Hydrometallurgy*, 167(1), 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.11.00>

Egy közel 150 éves öntöttvas vízvezetékcső grafitos korróziójának mikroszerkezeti vizsgálata

Microstructural investigation of graphitic corrosion in an approximately 150-year-old cast-iron water pipe

TÖRÖK TAMÁS ISTVÁN¹, KONCZ-HORVÁTH DÁNIEL², HEGEDÜS BALÁZS¹,
MÁDI LAURA¹

¹Miskolci Egyetem, Fémelőállítási és Öntészeti Intézet, Miskolc

²Miskolci Egyetem, Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet, Miskolc

A XIX. század második felében kiépített öntöttvas vízvezeték-hálózatok számos eleme napjainkban is üzemel, ezért hosszú távú korróziós viselkedésük vizsgálata mérnöki és örökségvédelmi szempontból egyaránt jelentős. A tanulmány célja egy közel 150 éves öntöttvas vízvezetékcső grafitos korróziójának mikroszerkezeti és kémiai vizsgálata pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) és energiadiszipatív röntgenspektroszkópia (EDS) alkalmazásával, különös tekintettel a grafitos korrózió mikroszerkezeti jellemzőinek és kialakulási mechanizmusának feltárására. A vizsgálatok kimutatták, hogy a közel 150 éves üzemidő ellenére a cső eredeti keresztmetszetének jelentős része megőrződött. A korrózió elsősorban a grafitlemezék környezetében zajlott, ahol lokális vas- és szilíciumtartalmú oxidfázisok kialakulása volt megfigyelhető. Az EDS-vizsgálatok emellett klór jelenlétét is kimutatták a korrodált zónákban, amely összhangban áll a grafitos korrózió szakirodalomban ismertett mechanizmusával. Az eredmények hozzájárulnak a történeti öntöttvas vízvezetékek hosszú távú korróziós folyamatainak és a grafitos korrózió kialakulásának jobb megértéséhez.

Kulcsszavak: grafitos korrózió, öntöttvas vízvezeték, történeti vízvezeték-hálózat

Many cast-iron water distribution pipelines installed during the second half of the nineteenth century remain in service today, making the investigation of their long-term corrosion behaviour important from both engineering and heritage conservation perspectives. The aim of this study was to investigate the microstructural and chemical characteristics of graphitic corrosion in an approximately 150-year-old cast-iron water pipe using scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), with particular emphasis on the microstructural features and formation mechanism of graphitic corrosion. The results revealed that, despite nearly 150 years of service, a substantial portion of the original pipe cross-section had been preserved. Corrosion occurred predominantly in the vicinity of the graphite flakes, where localized formation of iron- and silicon-containing oxide phases was observed. Furthermore, EDS analyses detected the presence of chlorine within the corroded regions, consistent with the graphitic corrosion mechanism reported in the literature. These findings contribute to a better understanding of the long-term corrosion processes and graphitic corrosion occurring in historical cast-iron water distribution systems.

Keywords: graphitic corrosion, iron alloys, cast iron, cast-iron water pipe, historical water distribution network

1. Bevezetés

A szürkeöntöttvas alkalmazása több mint kétezer éves múltra tekint vissza, azonban a modern öntöttvas nagyüzemi gyártása Abraham Darby koksszal történő nagyolvasztási eljárásának bevezetésével, 1707-ben kezdődött meg. A XVIII. századtól az öntöttvas csövek fokozatosan megjelentek a nagy kiterjedésű vízellátó rendszerekben. A korszak egyik legismertebb példája a Versailles vízellátását biztosító Machine de Marly volt (1. ábra), amely jól szemlélteti a kor fejlett vízgépészeti megoldásait és a vezetékes vízellátás korai alkalmazását. A XIX. század második felében az iparosodás, a városiasodás és a közegészségügyi követelmények fejlődése Európa-szerte felgyorsította a korszerű ivóvízellátó rendszerek kiépítését, amelyekben az öntöttvas csövek váltak a legelterjedtebb vezetékhagyományokká. Magyarországon a korszerű vízvezeték-hálózat kiépítése Pesten kezdődött meg, ahol az Első Pesti Vízmű 1868-ban átadott létesítményeihez szintén öntöttvas csöveket alkalmaztak [1–3].



1. ábra. A Machine de Marly korabeli ábrázolása Pierre-Denis Martin festményén (1722–1724). A XVIII. század elején működő vízellátó rendszer a vezetékes vízellátás egyik legismertebb történeti példája [2]

Az öntöttvas kedvező önthetősége, nagy nyomószilárdsága, megfelelő kopásállósága és viszonylag jó korrózióállósága lehetővé tette, hogy számos vezetéket több mint egy évszázadon keresztül üzemben maradjon. Napjainkban is jelentős hosszúságú történeti öntöttvas vízvezeték-hálózat működik világszerte, ezért ezek állapotának felmérése, maradó élettartamának becslése és felújításának tervezése mind műszaki, mind örökségvédelmi szempontból kiemelt jelentőségű [4].

Az öntöttvas csővezetékek hosszú távú üzemeltetését elsősorban a korróziós folyamatok befolyásolják. A korrózió mértékét és jellegét számos tényező határozza meg, többek között a talaj vagy a szállított közeg kémiai összetétele, az oxigénellátottság, a nedvességtartalom, valamint az öntöttvas mikroszerkezete. A különböző korróziós mechanizmusok közül a szürkeöntöttvas esetében kiemelt jelentőségű a grafi-

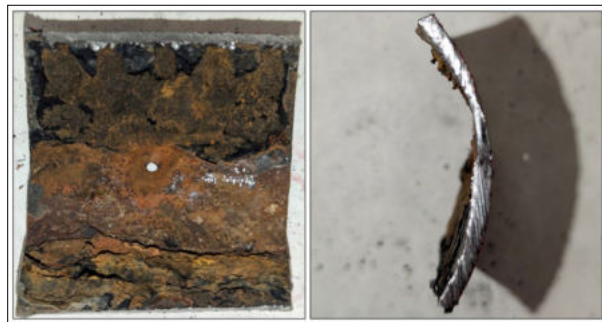
tos korrózió, amely során a fémes mátrix szelektíven feloldódik, miközben a grafitlemezek és a korróziós termékek nagyrészt visszamaradnak. Ennek következtében a cső külső geometriája gyakran megőrződik, ugyanakkor a mechanikai szilárdsága jelentősen csökken.

A grafitos korrózió mechanizmusát számos kutató vizsgálta. A klasszikus leírások szerint a grafitlemezek katódként viselkednek, míg a ferrites-perlites mátrix anódként oldódik. Újabb vizsgálatok rámutattak arra, hogy a korróziós folyamatban nemcsak a galvanikus kölcsönhatások, hanem a korróziós termékek szerkezete és az iontranszport is meghatározó szerepet játszik. Logan [5] és mások is kimutatták, hogy a grafitlemezek közötti korróziós réteg a korróziós folyamat előrehaladását is befolyásolja, míg Pimenta-Richardson [6] felhívta a figyelmet a szilícium oxidációjának és a korróziós termékek összetételének jelentőségére. Ennek ellenére viszonylag kevés olyan vizsgálat áll rendelkezésre, amely közel másfél évszázados üzemidőt követően elemzi a történeti öntöttvas vízvezetékek mikroszerkezeti állapotát és korróziós rétegének kémiai összetételét [4, 5].

A jelen tanulmány célja egy közel 150 éves öntöttvas vízvezetékcső grafitos korróziójának mikroszerkezeti és kémiai vizsgálata pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) és energiadiszperzív röntgenspektroszkópia (EDS) alkalmazásával. A vizsgálatok során a grafitos korrózió mikroszerkezeti jellemzőit, a korróziós termékek eloszlását, valamint a grafitlemezek környezetében kialakuló elemeloszlást elemeztük annak érdekében, hogy hozzájáruljunk a történeti öntöttvas vízvezetékek hosszú távú korróziós folyamatainak és a grafitos korrózió kialakulási mechanizmusának jobb megértéséhez.

2. Az ötvöztelen szénacél korróziója

Az ötvöztelen szénacél vízcsövek jellegzetes vízdali korróziós tönkremenetelének elsődleges oka a vízben oldott oxigén jelenlétében lejátszódó elektrokémiai korrózió. A korróziós folyamat rendszerint az oxigén-



2. ábra. Sprinkler rendszerből származó, AISI 1020 minőségű, alacsony széntartalmú acélcső kivágott szakaszának vízdali korróziós károsodása. A korrózió következtében jelentős falvékonyodás és lokális átlukadás figyelhető meg

nel jobban ellátott felületi területeken indul meg, majd idővel a csőfal fokozatos elvékonyodásához, végül akár átlukadásához vezet (2. ábra). A kialakuló korróziós termékek porózus szerkezetük miatt nem képeznek tartós védőréteget, ezért a korrózió folyamatosan előrehalad. Ennek eredményeként hosszabb üzemidő után jelentős falvékonyodás és lokális átlukadás alakulhat ki.

A 2. ábrán egy korábbi vizsgálatunk során elemzett, sprinkler rendszerből származó, AISI 1020 minőségű, alacsony széntartalmú acélső kivágott szakasza látható. A mintán jól megfigyelhető a vízdali korrózió következtében kialakult jelentős falvékonyodás és a lokális átlukadás.

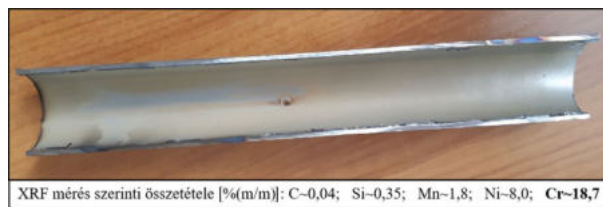
Az ötvöztelen szénacélok korróziója elsősorban a fémes keresztmetszet fokozatos csökkenésével jár. Ezzel szemben a szürkeöntöttvasban lejátszódó grafitos korrózió során a fémes mátrix szelektíven oldódik, miközben a grafitlemezek és a korróziós termékek nagyrészt megőrzik az eredeti szerkezetet. Ennek következtében a két anyag korróziós viselkedése és tönkremeneteli mechanizmusa jelentősen eltér egymástól.

3. A rozsdamentes acél korróziója

A rozsdamentes acélok korrózióállóságát elsősorban a legalább mintegy 11–30 % (m/m) krómtartalom biztosítja. A króm oxidáló környezetben a felületen néhány nanométer vastagságú, tömör szerkezetű, króm(III)-oxidban gazdag passzív védőréteget hoz létre, amely jelentősen csökkenti a fém oldódási sebességét. Kedvező környezeti feltételek mellett ez a passzív réteg sérülés esetén is képes spontán újraképződni, ezért a rozsdamentes acélok lényegesen jobb korrózióállósággal rendelkeznek, mint az ötvöztelen szénacélok.

A passzív réteg stabilitását azonban nagymértékben befolyásolja a környezet összetétele. Különösen a kloridionok jelenléte, a hőmérséklet emelkedése, valamint a kedvezőtlen áramlási és oxigénellátási viszonyok elősegíthetik a passzív film lokális károsodását. A passzív állapot megszűnését követően a védőréteg alatt a fém intenzív oldódása indulhat meg, amelynek egyik legjellemzőbb formája a lyukkorrózió (*pitting* korrózió). Ennek során a korrózió kis felületre koncentrálódik, miközben a környező felület továbbra is passzív állapotban marad, ezért a károsodás gyakran nehezen észlelhető, ugyanakkor rövid idő alatt jelentős helyi anyagvesztést okozhat (3. ábra).

Az ötvöztelen és a rozsdamentes acélok korróziós vi-



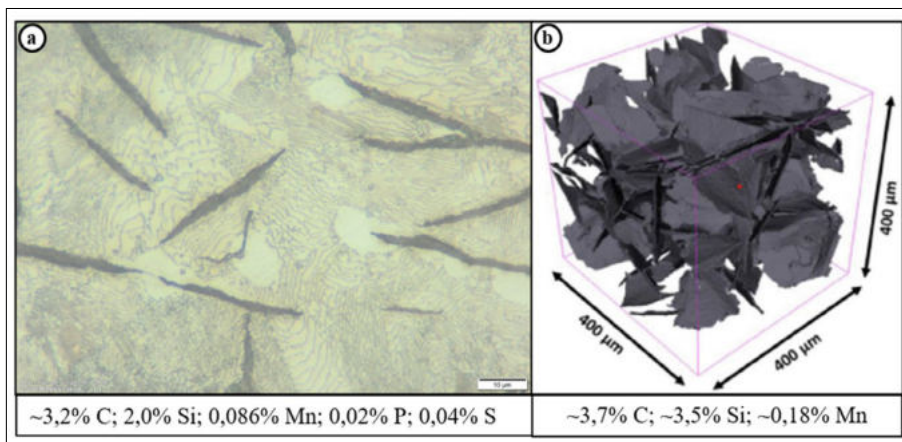
3. ábra. Krómmal erősen ötvözött, 10.4301 MSZ EN minőségű rozsdamentes csődarab lyukkorróziós (*pitting*) károsodása

selkedésétől eltérően a szürkeöntöttvasban a grafitlemezek jelenléte alapvetően befolyásolja a korróziós folyamatokat. Ennek következtében a szürkeöntöttvas sajátos korróziós mechanizmussal rendelkezik, amelyet a következő fejezetben ismertetünk.

4. A szürkeöntöttvas

A nagyipari vas- és acélgártás fejlődésével párhuzamosan egyre szélesebb körben terjedtek el a viszonylag olcsón előállítható, magas széntartalmú (~2,5–4,0 % (m/m)) és kedvező öntészeti tulajdonságokkal rendelkező öntöttvasok. A települési vízvezeték-hálózatok kiépítéséhez elsősorban grafitos, szürketőretű öntöttvasakat (*grey cast iron*) alkalmaztak, amelyek jó önthetőségüknek, nagy nyomószilárdságuknak és kedvező korrózióállóságuknak köszönhetően hosszú időn keresztül megbízhatóan üzemeltek.

A 100–150 évvel ezelőtt gyártott öntöttvas vízvezetékcsövek kémiai összetétele elsősorban foszfor- és kéntartalmában különbözött a napjainkban alkalmazott grafitos öntöttvasakétól. A korabeli öntöttvasak foszfortartalma jellemzően 0,3–0,9 % (m/m), míg kéntartalma 0,05–0,15 % (m/m) volt, amely lényegesen magasabb a jelenleg alkalmazott öntészeti anyagokénál. Összehasonlításképpen a napjainkban széles körben alkalmazott EN-GJL-250 minőségű szürkeöntöttvas foszfortartalma általában ~0,02 % (m/m), kéntartalma pedig ~0,04 % (m/m).



4. ábra. Grafitos (szürketőretű) öntöttvas minták mikroszerkezete: (a) optikai mikroszkópos 2D felvétel [7]; (b) háromdimenziós röntgenmikroszkópos (3D-XRM) rekonstrukció [8]

A szürkeöntöttvas jellegzetes mikroszerkezetét a fémes mátrixban elhelyezkedő lemezes grafit jellemzi. A grafit alakja, mérete és térbeli eloszlása alapvetően befolyásolja az öntöttvas mechanikai és korróziós tulajdonságait. A 4a. ábrán egy EN-GJL-250 minőségű grafitos szürkeöntöttvas optikai mikroszkópos felvétele látható, amelyen jól megfigyelhetők a fémes mátrixban elhelyezkedő grafitlemezek [7]. A 4b. ábra egy másik lemezgraftos öntöttvas mintáról készült háromdimenziós röntgenmikroszkópos (3D-XRM) rekonstrukciót mutat be [8], amely a grafitlemezek összetett térbeli morfológiáját szemlélteti. A háromdimenziós felvétel alapján ugyanakkor nem állapítható meg, hogy a grafitlemezek az öntvény teljes térfogatában egyetlen folytonos hálózatot alkotnak. A grafit térbeli elrendeződése az öntöttvas szilárdulása során kialakuló eutektikus cellaszerkezettel együtt értelmezendő.

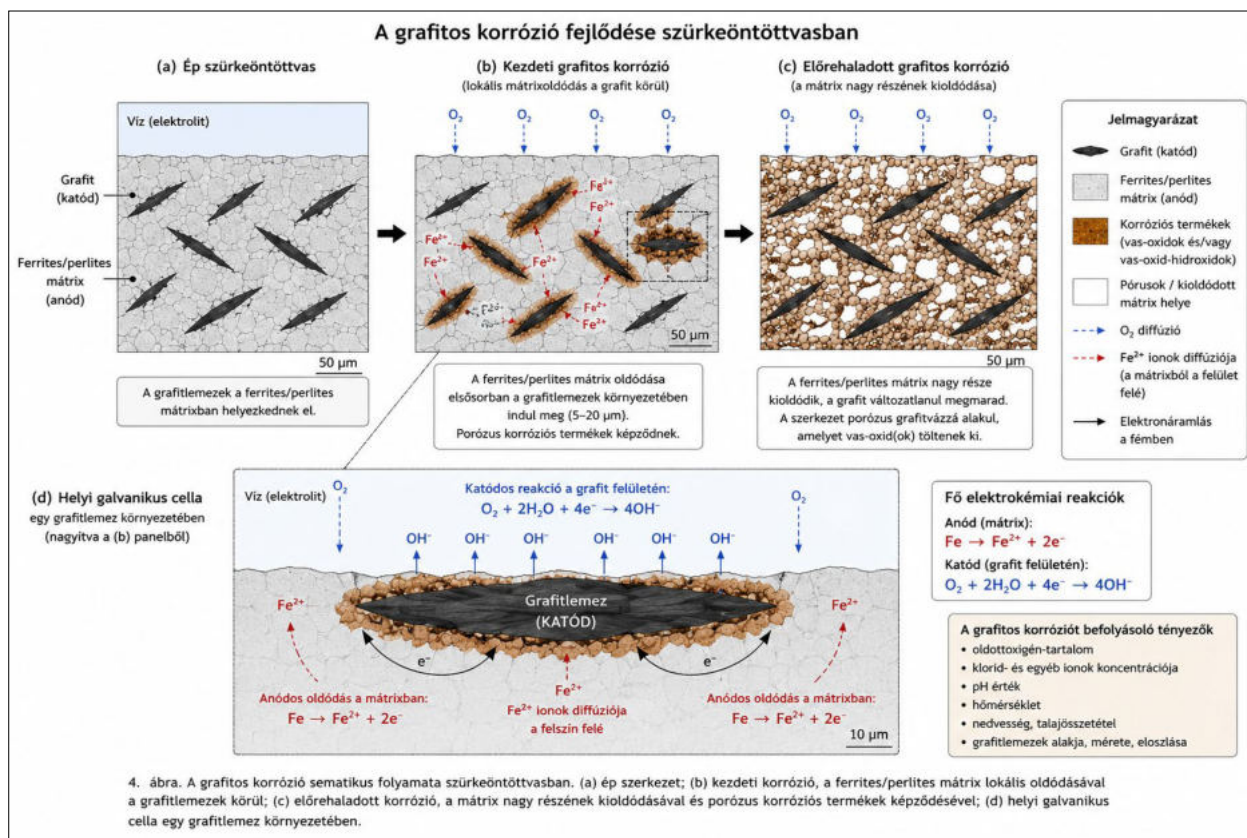
A grafitlemezek jelenléte nemcsak a mechanikai tulajdonságokat, hanem az öntöttvas korróziós viselkedését is alapvetően befolyásolja. A grafitos korrózió hosszú távú hatásainak vizsgálata érdekében a történeti öntöttvas vízvezetékcsőből kivágott mintán pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) és energiadisperzív röntgenspektroszkópiás (EDS) vizsgálatokat végeztünk. A vizsgálatok célja annak feltárása volt,

hogy a közel 150 éves üzemidő alatt milyen mikroszerkezeti és kémiai változások alakultak ki a cső belső, ivóvízzel érintkező, illetve külső, talajjal érintkező felületén. A vizsgálatok eredményeinek értelmezéséhez azonban először célszerű áttekinteni a grafitos korrózió mechanizmusát.

4.1. Szürkeöntöttvas korróziója

A grafitos korrózió kialakulásának alapja, hogy a grafitlemezek és a környező ferrites-perlites mátrix között elektrokémiai potenciálkülönbség áll fenn, aminek következtében nagyszámú lokális galvanikus cella alakul ki [5]. A grafit elektrokémiailag nemesebb fázisként katódként viselkedik, míg a környező ferrites-perlites mátrix anódként oldódik. A vas oldódása során keletkező Fe^{2+} -ionok a grafit-mátrix határfelületén és a kialakuló pórusrendszeren keresztül a korróziós zóna felé diffundálnak, ahol a vízben oldott oxigén redukciója során képződő hidroxidionokkal reagálva először vas(II)-hidroxidot, majd különböző vas-oxid- és vas-oxid-hidroxid korróziós termékeket képeznek.

A grafitos korrózió során tehát nem a grafitlemezek korrodálnak, hanem a grafitlemezeket körülvevő ferrites-perlites mátrix oldódik ki szelektíven. A korrózió



5. ábra. A grafitos korrózió sematikus kialakulása szürkeöntöttvasban: (a) ép mikroszerkezet; (b) a grafitlemezek környezetében meginduló lokális mátrixoldódás; (c) előrehaladott grafitos korrózió, amely során a grafitváz megmarad, míg a ferrites-perlites mátrix jelentős része kioldódik; (d) a grafitlemez környezetében kialakuló lokális galvanikus cella és az elektrokémiai folyamatok sematikus ábrázolása

kezdeti szakaszában a mátrix oldódása elsősorban a grafit–mátrix határfelület mentén indul meg, majd a folyamat előrehaladtával a grafitlemezek környezetében egyre kiterjedtebb porózus szerkezet alakul ki. Miközben a grafitlemezek nagyrészt változatlanul megmaradnak, a fémes mátrix jelentős része eltűnik, és helyét pórusok, valamint különböző vas-oxid- és vas-oxid-hidroxid korróziós termékek töltik ki. Ennek következtében a cső külső geometriája hosszú ideig változatlan maradhat, ugyanakkor mechanikai szilárdsága jelentősen csökken.

Logan [5] rámutatott arra, hogy a grafitlemezek és a fémes mátrix közötti határfelület nem csupán az elektrokémiai reakciók helyszíne, hanem az iontranszport számára is kedvező útvonalat biztosít, amely elősegíti a korróziós front előrehaladását a grafithálózat mentén. Ez a modell magyarázatot ad arra, hogy a korrózió miatt elsősorban a grafitlemezek közvetlen környezetében koncentrálódik.

A grafitos korrózió során a vasmátrix oldódásával párhuzamosan különböző vas-oxid- és vas-oxid-hidroxid fázisok képződhetnek. Az irodalom szerint a korróziós réteg leggyakrabban goethitet (α -FeOOH), lepidokrokitot (γ -FeOOH), akaganeitet (β -FeOOH), magnetitet (Fe_3O_4), maghemitet (γ - Fe_2O_3) és hematitot (Fe_2O_3) tartalmazhat. Az egyes fázisok kialakulását jelentősen befolyásolják a helyi oxidációs viszonyok, valamint a közeg kémiai összetétele, különösen a pH, a karbonátkeménység, valamint a klorid- és szulfát-tartalom.

A grafitos korrózió kialakulásának főbb lépéseit az 5. ábra szemlélteti. Az ábra bemutatja a folyamat három jellegzetes állapotát: (a) az ép grafitos szürkeöntöttvas mikroszerkezetét, (b) a grafitlemezek környezetében meginduló lokális mátrixoldódást, valamint (c) az előrehaladott grafitos korrózió állapotát, amelyben a ferrites-perlites mátrix jelentős része már kioldódott, miközben a grafitváz és a porózus korróziós termékek visszamaradnak. A (d) részre egy grafitlemez környezetében kialakuló lokális galvanikus cella sematikus működését mutatja be [5].

A jelen munkában bemutatott pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) és energiadiszipatív röntgenspektroszkópiás (EDS) vizsgálatok célja annak feltárása volt, hogy a közel 150 éves üzemidő alatt a grafitlemezek környezetében milyen mértékű szelektív mátrixkioldódás következett be, valamint milyen korróziós termékek alakultak ki a cső belső, ivóvízzel érintkező, illetve külső, talajjal érintkező felületén.

5. A vizsgált közel 150 éves öntöttvas vízvezetékcső

A jelen vizsgálat tárgyát egy, a XIX. század második felében létesített pesti öntöttvas vízvezeték-hálózatból származó csődarab képezte. A mintát a vezetékaszakasz felújítása során emelték ki, majd később kutatási

célra megőrizték. A cső a korabeli grafitos szürkeöntöttvas vízvezeték jellegzetes képviselője, ezért alkalmas a hosszú idejű üzemi korróziós folyamatok vizsgálatára.

A vizsgált csődarab fényképe a 6. ábrán látható. A belső felületen jelentős vastagságú korróziós réteg és vízkőkiválás figyelhető meg, míg a külső felület a talajjal való több mint egy évszázados érintkezés következtében erősen korrodált. A két eltérő környezet lehetőséget biztosított a belső (ivóvízzel érintkező) és a külső (talajjal érintkező) felületen lejátszódó korróziós folyamatok összehasonlítására.



6. ábra. A XIX. század második felében gyártott pesti öntöttvas vízvezetékcső vizsgált darabja. A képen látható a belső korróziós és lerakódási réteg, valamint a metallográfiai vizsgálatokhoz kifűrészelt mintavételi hely

A mikroszerkezeti és elemanalitikai vizsgálatokhoz a cső egyik sarkából mintát vágunk ki, amelyet metallográfiai előkészítést követően pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) és energiadiszipatív röntgenspektroszkópiás (EDS) vizsgálatoknak vetettünk alá. A mintavételi helyet a 6. ábra jelöli. A vizsgálatok elsődleges célja a grafitlemezek környezetében kialakuló szelektív mátrixkioldódás, valamint a belső és külső korróziós rétegek mikroszerkezetének és elemi összetételének összehasonlító elemzése volt.

6. Vizsgálati módszerek

A kivágott próbatestet metallográfiai vizsgálatokhoz előkészítettük: egy részét tükörfényesre csiszoltuk, míg egy másik részét töretfelületként vizsgáltuk a korróziós termékek eredeti elhelyezkedésének megőrzése érdekében.

A minta teljes keresztmetszetét, valamint a kijelölt vizsgálati területeket pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) vizsgáltuk különböző nagyítások mellett. A teljes keresztmetszetről készült SEM-felvételek segítségével meghatároztuk a korróziós zónák elhelyezke-

dését, valamint kijelöltük a részletes mikroszerkezeti és elemanalitikai vizsgálatok helyét.

A mikroszerkezeti vizsgálatokat egy Thermo-Fisher Helios G4 PFIB CXe típusú pásztázó elektronmikroszkóppal végeztük. A felvételek jellemzően visszaszórtelektron-detektorral, 20 kV gyorsítófeszültség és 0,8 nA áramerősség, valamint 8 mm munkatávolság és 100-250-500-1000-szeres nagyítás mellett készültek. Az elemi összetétel meghatározásához és az elemek eloszlásának vizsgálatához AMETEK Octane ElectPlus energiadisziperzív röntgenspektrométert alkalmaztunk. A pontanalízisek mérési ideje 20 s, míg az elemtérképek gyűjtési ideje az adott látómezőre vonatkoztatva 28 min volt. Az elemek mennyiségeit atomszázalékban (at%) és tömegszázalékban (wt%) TEAM (EDAX) szoftver segítségével értékeltük ki. A minták előkészítése vágással és ultrahangos tisztítással, míg a mikrociszolatok esetében a beágyazásokat követően csiszolással és polírozással történt.

Az elemi összetétel meghatározását a SEM-hez kapcsolt energiadisziperzív röntgenspektroszkópiás (EDS) rendszerrel végeztük. Az EDS-vizsgálatok során pontanalíziseket és területi elemtérképezést alkalmaztunk az ötvözet főbb alkotóelemeinek (Fe, C, Si, Mn, P és S), valamint a korróziós folyamat szempontjából jelentős elemek (O, Cl, Ti és V) eloszlásának vizsgálatára.

A vizsgálatok elsődleges célja annak meghatározása volt, hogy a grafitos korrózió milyen mikroszerkezeti változásokat idézett elő a grafitlemezek környezetében, továbbá hogyan változik az egyes elemek eloszlása a még ép, illetve a részlegesen korrodált területeken. Külön figyelmet fordítottunk az oxigén-, szilícium- és klóreloszlás vizsgálatára, mivel ezek fontos információt szolgáltatnak a korróziós mechanizmus és a korróziós termékek kialakulásának értelmezéséhez.

7. Eredmények és értékelés

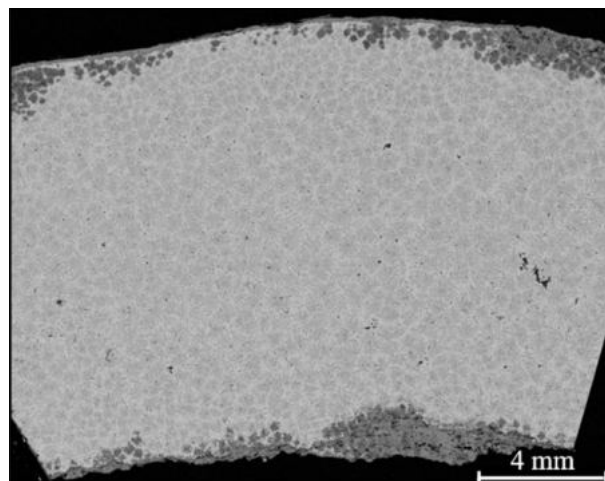
7.1. A teljes keresztmetszet SEM-vizsgálata

A kivágott mintából készített teljes keresztmetszet SEM-felvétele a 7. ábrán látható. A vizsgált öntöttvas cső falvastagsága megközelítőleg 115–120 mm, amelyből a közel 150 éves üzemidő ellenére a keresztmetszet mintegy 80–90%-a még az eredeti öntöttvas szerkezetet őrizte meg. Ez arra utal, hogy a korrózió a hosszú üzemidő alatt sem egyenletesen haladt előre, hanem elsősorban a felületi rétegekre korlátozódott. A SEM-felvételen jól elkülöníthető az eredeti, még nem korrodálódott öntöttvas szerkezete, valamint a belső, ivóvízzel érintkező felület közelében kialakult korróziós zóna. A belső felületen több, eltérő szerkezetű korróziós és lerakódási réteg figyelhető meg, míg a külső, talajjal érintkező oldalon

a korrózió kisebb mértékű. A korróziós károsodás tehát elsősorban a cső belső felületére koncentrálódott.

A kis nagyítású keresztmetszeti SEM-felvételen az öntöttvas eutektikus cellás szerkezete is megfigyelhető. A külső felülethez közeli tartományban kisebb, megközelítőleg 0,4 mm átmérőjű, míg a falvastagság belsőbb tartományaiban nagyobb, megközelítőleg 1 mm átmérőjű eutektikus cellák figyelhetők meg. A korróziós zóna morfológiája helyenként követi az eutektikus cellák körvonalát, ami arra utal, hogy a grafitos korrózió lokális előrehaladását az eredeti eutektikus cellaszerkezet is befolyásolhatja.

A teljes keresztmetszet vizsgálata lehetővé tette a részletes SEM–EDS vizsgálati területek kijelölését. A további méréseket egyrészt az eredeti, még nem korrodálódott öntöttvas szövetszerkezetén, másrészt a részlegesen korrodálódott belső felületi zónában végeztük el annak érdekében, hogy összehasonlítható legyen a grafitos korrózió előtti és utáni mikroszerkezet, valamint az elemek eloszlása.

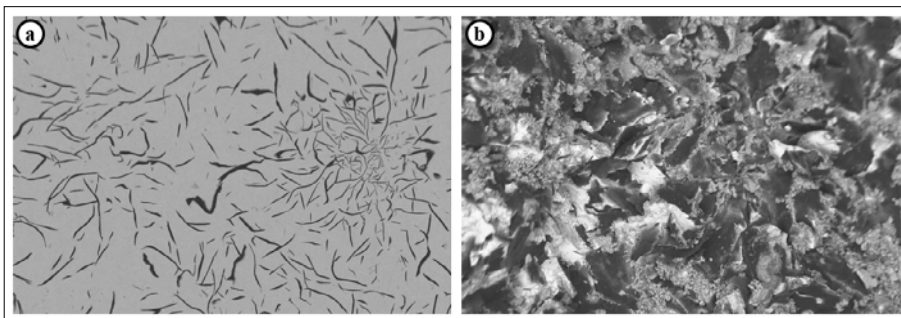


7. ábra. A vizsgált öntöttvas vízvezetékcső teljes keresztmetszetéről készült SEM-felvétel. A képen jól elkülöníthető az eredeti öntöttvas szerkezete, valamint a belső felület közelében kialakult korróziós zóna. A részletes SEM–EDS vizsgálatok ezen a területen történtek

7.2. Az eredeti öntöttvas mikroszerkezete

A grafitos korrózió okozta mikroszerkezeti változások értékeléséhez elsőként a még nem korrodálódott öntöttvas szerkezetét vizsgáltuk. A részletes SEM-vizsgálatokhoz a kifűrészelt próbatest polírozott csiszolati felületét, valamint töretfelületét is elemeztük.

A 8a. ábrán látható polírozott csiszolati SEM-felvételen jól megfigyelhető a grafitos szürkeöntöttvasra jellemző mikroszerkezet. A ferrites-perlites mátrixban különböző hosszúságú és orientációjú grafitlemezek figyelhetők meg. A grafitlemezek elrendeződése az öntöttvas eutektikus cellás szilárdulási szerkezetével hozható kapcsolatba, amelynek jellegzetességei



8. ábra, A vizsgált öntöttvas cső még nem korrodálódott részének mikroszerkezete. (a) Polírozott csiszolatról készült SEM-felvétel, amelyen jól megfigyelhető a lemezgrafitos szürkeöntöttvas mikroszerkezete. (b) A minta töretfelületéről készült SEM-felvétel, amely a grafitlemezek térbeli morfológiáját szemlélteti

már a teljes keresztmetszetről készült kis nagyítású SEM-felvételen (7. ábra) is megfigyelhetők.

A 8b. ábrán bemutatott SEM-töretfelvétel a grafitlemezek térbeli morfológiájának szemléltetését teszi lehetővé. A töretfelületen a grafitlemezek a fémes mátrixból kiemelkedve, különböző irányultságban figyelhetők meg, ami jól érzékelteti a lemezgrafitos szürkeöntöttvas összetett háromdimenziós mikroszerkezetét. A töretfelvétel ugyanakkor önmagában nem alkalmas a grafitlemezek teljes térbeli összekapcsoltságának meghatározására. Az eutektikus cellákon belüli grafitálózat és annak korrózióban betöltött szerepét ezért a további SEM-felvételek alapján értékeljük.

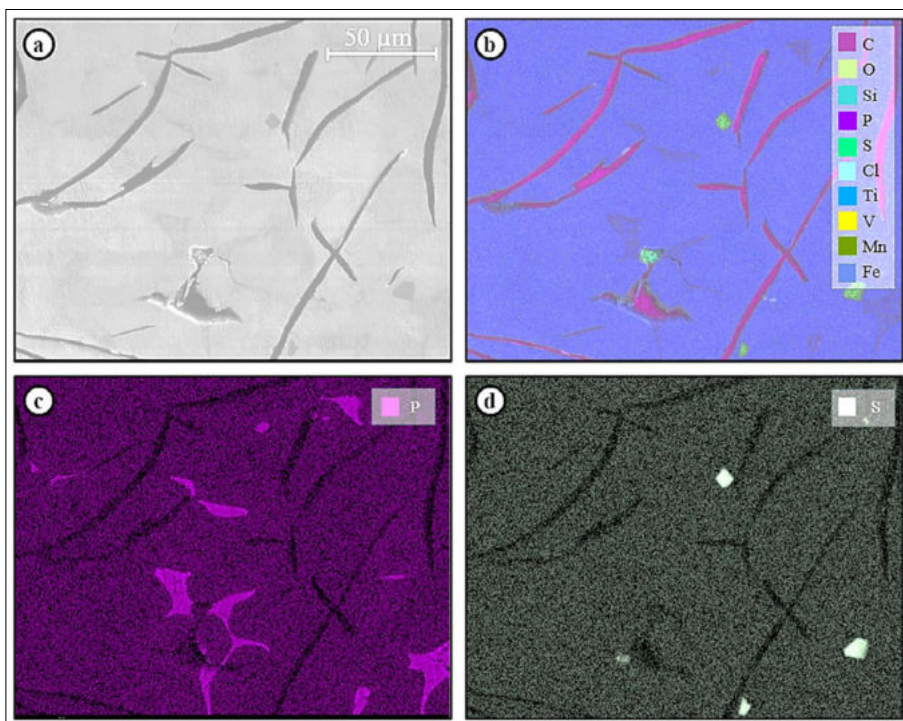
Az eredeti mikroszerkezet részletes ismerete alapvető fontosságú a korróziós folyamatok értelme-

7.3. Az eredeti öntöttvas elemi összetétele és elemeloszlása

Az eredeti, még nem korrodálódott öntöttvas elemi összetételét és az egyes elemek térbeli eloszlását SEM-EDS vizsgálatokkal elemeztük. A vizsgált terület SEM-felvételét, valamint a hozzá tartozó elemterképeket a 9. ábra mutatja. Az elemterképek jól szemléltetik a grafitlemezek és az azokat körülvevő fémes mátrix eltérő elemi összetételét.

Az összesített elemterkép (9b. ábra) alapján a karbon elsősorban a grafitlemezekhez köthető területeken koncentrálódik, míg a vas a fémes mátrix meghatározó alkotóeleme. Az EDS-vizsgálatok során a vizsgált területen szilícium (~1,8%), mangán (~1,5%), foszfor (~0,5%) és kén (~0,2%) jelenléte is kimutatható volt. Emellett kisebb mennyiségben titán és vanádium is megjelent, amelyek feltehetően a korabeli nyersanyagokból, illetve az alkalmazott gyártástechnológiából származó kísérőelemek.

A foszfor és a kén térbeli eloszlását a 9c., d. ábra külön is szemléltetik. Mindkét elem esetében lokális feldúsulás figyelhető meg az öntvény egyes területein, ami a szürkeöntöttvas szilárdulása során kialakuló mikroszerkezeti és kémiai inhomogenitásokkal hozható összefüggésbe. A foszfor lokális feldúsulása elsősorban a foszfid eutektikumhoz köthető területeken figyelhető meg. A foszfor a szilárdu-



9. ábra. A még nem korrodálódott öntöttvas mikroszerkezetének SEM-EDS vizsgálata. (a) SEM-felvétel a vizsgált területről; (b) az EDS-elemterképek összesített megjelenítése (C, O, Si, P, S, Cl, Ti, V, Mn és Fe); (c) a foszfor; valamint (d) a kén térbeli eloszlása

lás során a maradék olvadáskorban dúsul fel, ezért a foszfid eutektikum a szilárdulás késői szakaszában, az utoljára megszilárduló olvadéktartományokban alakulhat ki. A foszforban gazdag területek elhelyezkedése ezáltal az öntvény lokálisan utoljára megszilárduló tartományainak helyére is utalhat.

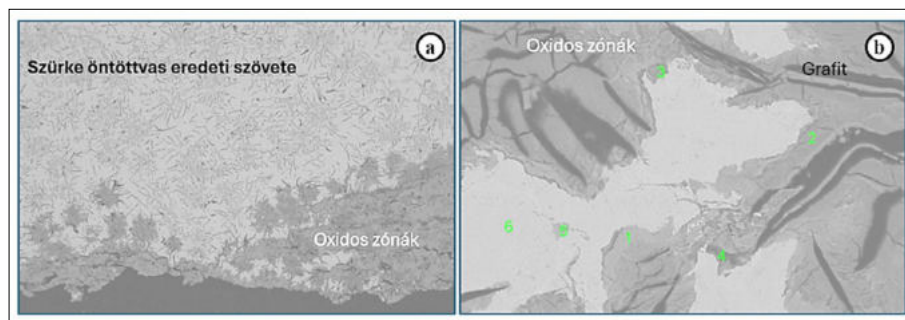
A kén eloszlása ezzel szemben erősen lokalizált.

A 9b., d. ábrán jól elkülönülő, szögletes, kénben gazdag részecskék figyelhetők meg. Ezek morfológiájuk és elemi összetételük alapján feltehetően mangán-szulfid- (MnS-) zárványok, amelyek több esetben a grafitlemezek közvetlen környezetében helyezkednek el. A szakirodalom szerint az MnS-tartalmú részecskék a lemezgrafitos öntöttvas heterogén csíráképződési folyamataiban is szerepet játszhatnak, és kapcsolatba hozhatók a grafit, illetve az eutektikus cellák kialakulásával [8]. A jelen vizsgálatok alapján azonban a részecskék pontos fázisazonosítása nem végezhető el, ezért MnS-zárványként történő azonosításuk az EDS-elemeloszlás és a megfigyelt morfológia alapján valószínűsíthető.

Az eredeti öntöttvas elemeloszlásának ismerete fontos referenciát jelent a grafitos korrózió során bekövetkező változások értékeléséhez. Különösen a grafit, a fémes mátrix, valamint a foszforban és kénben gazdag mikroszerkezeti területek elkülönítése teszi lehetővé, hogy a korrodált zónában megfigyelt elemeloszlási változásokat az eredeti mikroszerkezettel összehasonlítsuk. A következő fejezetben ezért a korrodált zónában kialakuló mikroszerkezeti és elemeloszlási változásokat mutatjuk be.

7.4. A grafitos korrózió mikroszerkezeti változásai

A részlegesen grafitosan korrodált belső felületi zónából készített SEM-felvételek a 10. ábrán láthatók. A kis nagyítású felvételen (10a. ábra) jól elkülöníthető az eredeti, még nem korrodálódott öntöttvas szer-



10. ábra. A részlegesen grafitosan korrodált belső felület SEM-felvételei. (a) A korrodált réteg áttekintő képe 25× nagyításban. (b) A grafitlemezeket és az oxidos zónát bemutató részlet 500× nagyításban. A számozott pontok az EDS pontanalízis helyeit jelölik, amelyek eredményeit az 1. táblázat foglalja össze

kezete, valamint a belső felület mentén kialakult korróziós réteg. A korrózió nem egyenletes vastagságú, hanem lokálisan mélyebben hatol az alapanyagba, ami a grafitos korrózió inhomogén előrehaladására utal.

A nagyobb nagyítású SEM-felvételen (10b. ábra) jól megfigyelhető, hogy a korrózió elsősorban a grafitlemezeket körülvevő ferrites-perlites mátrixot érinti. A grafitlemez morfológiája nagyrészt változatlan marad, miközben a környező fémes mátrix fokozatosan kioldódik. Az így kialakuló üregeket és pórusokat finomszemcsés korróziós termékek töltik ki, ezért a grafitlemezek eredeti elrendeződése a korrodált rétegben is jól felismerhető marad.

A 7–10. ábrákon megfigyelhető mikroszerkezeti sajátosságok hipoeutektikus szilárdulásra utalnak. Hipoeutektikus szürkeöntöttvas esetében a szilárdulás során először primer ausztenit képződik, majd a további dermedés során a grafit eutektikus cellákban kristályosodik ki. Az eutektikus cellák különálló, külön csírákból növekvő kristályosodási egységek, amelyekben belül a grafitlemezek összefüggő hálózatot alkotnak. Ennek megfelelően a SEM-felvételeken megfigyelhető cellás, illetve rozettás korróziós morfológia kapcsolatba hozható az eredeti eutektikus cellaszerkezettel.

A még ép és a korrodált szerkezet összehasonlítása alapján megállapítható, hogy a grafitos korrózió során nem a grafitlemezek korrodálódnak, hanem az azokat körülvevő ferrites-perlites mátrix oldódik ki szelektíven. Ez összhangban van a grafitos korrózió

1. táblázat. Atomszázalékos elemösszetételi adatok a 10b. ábrán kijelölt mérési pontokban

Elemek at.%	Fe	Si	C	O	Mn	Cl	S	P	V	Ti
1. pont	46,6	1,39	5,41	45,1	–	1,48	–	–	–	–
2. pont	26,8	16,5	5,90	49,6	1,20	–	–	–	–	–
3. pont	24,1	8,14	27,8	34,4	2,59	0,90	0,82	1,19	–	–
4. pont	29,6	3,21	41,0	22,8	0,59	2,34	0,44	–	–	–
5. pont	26,8	2,76	12,8	26,4	5,35	1,66	6,93	–	5,46	11,8
6. pont	82,0	4,81	6,26	6,01	0,88	–	–	–	–	–

elektrokémiai mechanizmusával (5. ábra), amely szerint a grafitlemezek lokális katódként, míg a környező vasmátrix anódként viselkedik. Ennek következtében a korrózió a grafitlemezek közvetlen környezetében a legintenzívebb.

A 10b. ábrán kijelölt pontokban EDS pontanalízist végeztünk, amelynek atomszázalékos eredményeit az 1. táblázat foglalja össze. A pontmérések célja az oxidokban gazdag területek, a grafitlemezek környezete, valamint a még ép öntöttvas mátrix elemi összetételének összehasonlítása volt.

Az 1. táblázat alapján megállapítható, hogy az egyes mérési pontok elemi összetétele jelentős eltéréseket mutat. Az 1. mérési pontban mért magas vas- és oxigéntartalom vasban gazdag korróziós termékek jelenlétére utal. A klór egyidejű kimutatása arra enged következtetni, hogy a korróziós folyamat során klórtartalmú korróziós termékek is kialakulhattak.

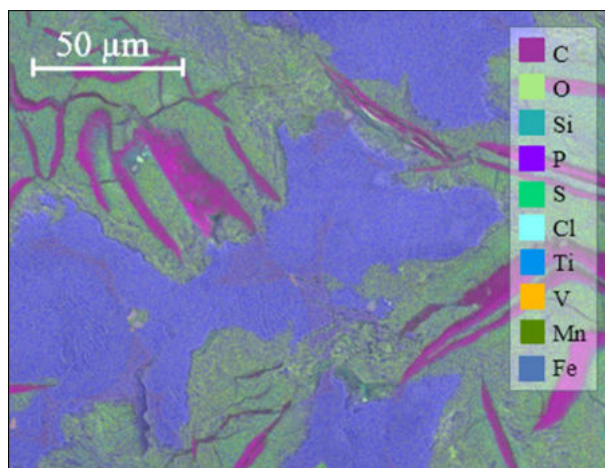
A 2. mérési pontban a vas és az oxigén mellett jelentősen megnövekedett szilíciumtartalom figyelhető meg. Ez arra utal, hogy ezen a területen szilíciumban gazdag oxidfázisok vagy egyéb szilíciumtartalmú korróziós termékek lehetnek jelen.

A 3–5. mérési pontok átmeneti zónákat reprezentálnak a még ép öntöttvas és a korróziós réteg között. Ezek a területeken a karbon, a vas, az oxigén és a szilícium egyidejű jelenléte figyelhető meg, ami jól szemlélteti a grafitlemezeket körülvevő ferrites-perlites mátrix szelektív kioldódását, valamint a korróziós termékek fokozatos kialakulását.

A 6. mérési pont ezzel szemben még döntően az eredeti öntöttvas mátrixot reprezentálja, amit a magas vastartalom (82,0 at.%) és az alacsony oxigéntartalom (6,0 at.%) is alátámaszt.

Meg kell jegyezni, hogy az EDS-vizsgálat kizárólag az elemek jelenlétének és mennyiségének meghatározására alkalmas. Hidrogén ezzel a módszerrel nem mutatható ki, ezért a hidratált korróziós termékek víztartalma, valamint a korróziós termékek pontos kémiai és ásványtani fázisösszetétele EDS-vizsgálattal önmagában nem határozható meg. A jelen fejezetben ismertetett értelmezések ezért az elemek eloszlásán és azok együttes előfordulásán alapulnak.

Az EDS pontanalízis eredményei jól szemléltetik, hogy a grafitos korrózió során az egyes mikroszerkezeti területek elemi összetétele jelentősen megváltozik. Különösen figyelemre méltó a korróziós zónákban megfigyelhető oxigén- és szilíciumfeldúsulás, valamint a klór lokális jelenléte, amelyek fontos szerepet játszhatnak a korróziós folyamatok lefolyásában. Az elemek részletes területi eloszlását és ezek kapcsolatát a grafitos korrózió mechanizmusával a következő fejezetben, a SEM-EDS elemtérképek alapján mutatjuk be.



11. ábra. A grafitosan korrodált zóna SEM-EDS elemtérképe. Az összesített elemtérkép a karbon (C), oxigén (O), szilícium (Si), foszfor (P), kén (S), klór (Cl), titán (Ti), vanádium (V), mangán (Mn) és vas (Fe) relatív térbeli eloszlását szemlélteti a 10b. ábrán kijelölt vizsgálati területen

7.5. A grafitos korrózió elemeloszlása

A grafitosan korrodált zóna elemi eloszlását SEM-EDS elemtérképezéssel vizsgáltuk. A 11. ábra a 10b. ábrán kijelölt terület összesített elemtérképét mutatja, amely lehetővé teszi a főbb ötvözőelemek és a korróziós folyamat során feldúsuló elemek térbeli eloszlásának összehasonlítását.

A 11. ábrán jól megfigyelhető, hogy a karbon továbbra is elsősorban a grafitlemezekben koncentrálódik, amelyek a korróziós folyamat során nagyrészt megőrzik eredeti alakjukat és elhelyezkedésüket. Ezzel szemben a vas eloszlása jelentősen megváltozik: a grafitlemezeket körülvevő ferrites-perlites mátrix kioldódásával a vastartalom csökken, miközben az oxigén koncentrációja a korróziós rétegben jelentősen megnő. Ez a jelenség jól szemlélteti a korróziós termékek kialakulását és a mátrix fokozatos átalakulását.

Az elemtérképek alapján a szilícium a korrodált területeken lokális feldúsulást mutat. Ez arra utal, hogy a vas szelektív kioldódása során a szilícium kevésbé mobilis, ezért a korróziós rétegben feldúsulhat, illetve szilíciumban gazdag korróziós termékek kialakulásához járulhat hozzá. Hasonló jelenségről több korábbi vizsgálat is beszámolt, amelyek szerint a grafitos korrózió előrehaladtával a szilícium relatív koncentrációja növekszik a korróziós zónában. A szilíciumban gazdag fázisok kialakulása hozzájárulhat a korróziós réteg stabilizálódásához is, mivel a szilícium-oxidok kémiaiilag igen stabil vegyületek. Hasonló jelenség figyelhető meg a fa természetes megkövesedése során is, ahol a szerves szerkezet fokozatosan szilícium-dioxidban gazdag ásványi anyaggal helyettesítődik, miközben az eredeti szerkezet nagy része megőrződik. A grafitos korrózió esetében ugyan nem teljes ásványosodás megy végbe, azonban a kevésbé

mobilis szilícium feldúsulása és a vas kioldódása hasonló módon hozzájárulhat a korróziós réteg szerkezeti stabilitásának kialakulásához. A klór elsősorban a korróziós termékekben gazdag területeken figyelhető meg, míg az eredeti öntöttvas mátrixban csak kis mennyiségben mutatható ki. Ez arra utal, hogy a klór szerepet játszott a korróziós folyamatokban, illetve beépülhetett a kialakuló korróziós termékekbe.

A foszfor és a kén eloszlása a teljes vizsgált területen nem egyenletes. Mindkét elem lokális feldúsulása figyelhető meg, amely összefügghet az eredeti öntöttvas mikroszerkezetével, valamint a korrózió során végbemenő elemoldási folyamatokkal. A titán és a vanádium csak kis mennyiségben mutatható ki, eloszlásuk nem mutat egyértelmű kapcsolatot a grafitos korrózió előrehaladásával.

Az elemtérképek összességében megerősítik, hogy a grafitos korrózió során nem a grafitlemezek bomlanak le, hanem az azokat körülvevő ferrites-perlites mátrix oldódik ki szelektíven. A grafitváz megmarad, miközben a vas fokozatosan eltűnik a mátrixból, helyét pedig oxigénben gazdag korróziós termékek foglalják el. A szilícium és kisebb mértékben a klór lokális feldúsulása tovább árnyalja ezt a folyamatot, és jól összhangban áll a szakirodalomban ismertetett grafitos korróziós mechanizmussal [4, 8].

A 10b. ábra 3. mérési pontjában meghatározott elemi összetétel alapján feltételezhető, hogy a korróziós rétegben vas-oxidok és vas-oxi-hidroxidok, valamint szilíciumtartalmú oxidfázisok is jelen lehetnek.

A klór kimutatása arra utal, hogy klórtartalmú korróziós termékek kialakulása sem zárható ki. A mért elemi összetétel és a grafitos korrózióval foglalkozó szakirodalomban leírt folyamatok alapján a vizsgált területen a 2. táblázatban felsorolt korróziós termékek és fázisok jelenléte valószínűsíthető.

7.6. A szilícium, a kén és a klór elemeloszlása

A kén (a), a szilícium (b) és a klór (c) SEM–EDS intenzitáseloszlását a 12. ábra szemlélteti.

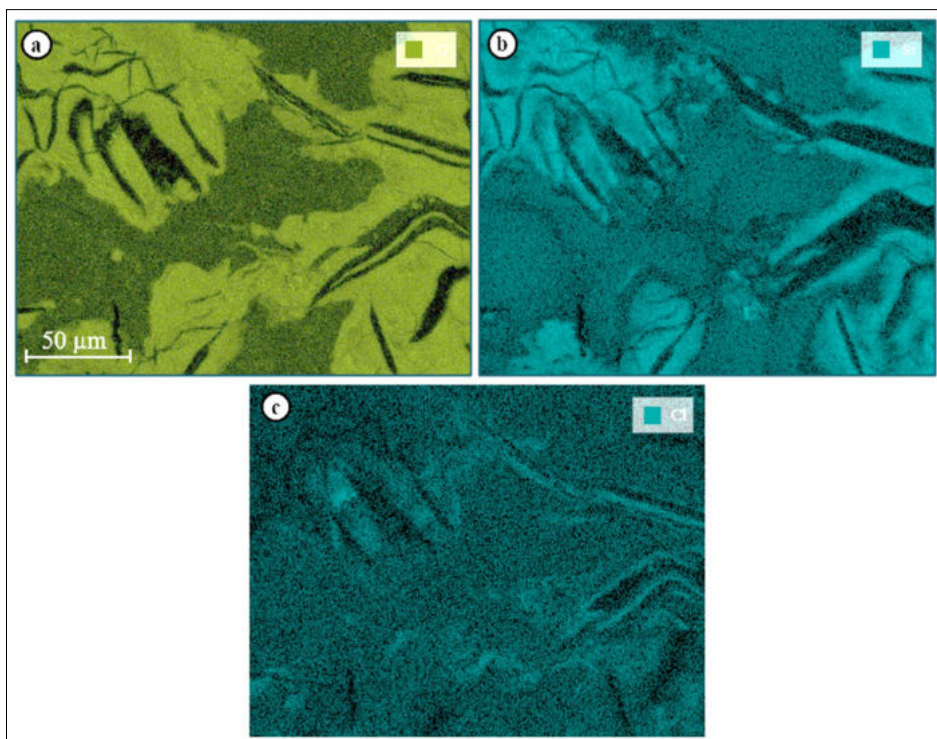
A szilícium intenzitáseloszlása alapján megfigyelhető, hogy a

vizsgált területen a szilícium nem egyenletesen oszlik el, hanem lokális feldúsulások figyelhetők meg a korróziós rétegben. Ez arra utal, hogy a grafitos korrózió során a vas szelektív kioldódásával párhuzamosan a szilícium relatív koncentrációja növekszik, illetve szilíciumban gazdag oxidfázisok is kialakulhatnak. Ez összhangban áll a szakirodalomban leírt grafitos korróziós mechanizmussal, amely szerint a szilícium mobilitása kisebb, mint a vasé, ezért a korróziós rétegben feldúsulhat.

2. táblázat. Az EDS pontanalízis alapján feltételezhető korróziós termékek és fázisok

Feltételezett fázis	Kémiai képlet
Akaganeit	$\beta\text{-FeOOH}$
Magnetit	Fe_3O_4
Vas-oxi-hidroxid(ok)	FeOOH
Amorf szilícium-dioxidban gazdag fázis(ok)	SiO_2 (amorf)
Mangán-oxid(ok)	MnO_x
Mangán-szulfid	MnS

Megjegyzés: A táblázatban szereplő fázisok az EDS pontanalízissel meghatározott elemi összetétel és a szakirodalomban ismertetett korróziós folyamatok alapján feltételezhetőek. Az EDS-vizsgálat önmagában nem alkalmas a fázisok egyértelmű azonosítására, ezért a felsorolt vegyületek jelenléte csak valószínűsíthető.



12. ábra. Az oxigén (a), a szilícium (b) és a klór (c) SEM–EDS intenzitáseloszlása a vizsgált minta 10b. ábrán bemutatott területén

Az oxigén elem térképe kiterjedt, összefüggő eloszlást mutat a vizsgált területen, ami a mátrix nagymértékű oxidációjára és egy kiterjedt korróziós réteg jelenlétére utal. Az oxigén eloszlása a korrodálódott fém alapanyagra koncentrálnak, míg az elem térképen látható sötét, oxigénhiányos (intenzitásmentes) területek a grafitlamelláknak feleltethetők meg. Az oxigén jelenléte az alapanyag vas-oxidokká és vas-oxi-hidroxidokká alakulására utal, ugyanakkor az alkalmazott EDS-vizsgálat alapján azonban a kéntartalmú fázisok egyértelmű azonosítása nem lehetséges. A klór elem eloszlása szintén lokális feldúsulásokat mutat a korróziós rétegben. A klór jelenléte arra utal, hogy a korróziós folyamat során klórtartalmú korróziós termékek is kialakulhattak. A 10b. ábra 3. mérési pontjában meghatározott elemi összetétel alapján feltételezhető, hogy a korróziós termékek között vas-oxidok, vas-oxi-hidroxidok, valamint szilíciumtartalmú oxidfázisok is jelen lehetnek. A mért elemi összetétel és a grafitos korrózióval foglalkozó szakirodalomban ismertett folyamatok alapján a vizsgált területen a 2. táblázatban felsorolt korróziós termékek és fázisok jelenléte valószínűsíthető. Az EDS-vizsgálat ugyanakkor önmagában nem alkalmas a korróziós termékek egyértelmű fázisazonosítására, ezért a felsorolt vegyületek jelenléte csak valószínűsíthető [4].

8. Az eredmények értelmezése

8.1. A grafitos korrózió mechanizmusa

A SEM-EDS vizsgálatok eredményei jól alátámasztják a szakirodalomban ismertett grafitos korróziós mechanizmust. A korrózió során a grafitlemezek katódként, míg a ferrites-perlites mátrix anódként viselkedik, ezért a vas oldódása elsősorban a grafitlemezek környezetében megy végbe. A SEM-felvételeken megfigyelhető, hogy a grafitlemezek morfológiája nagyrészt változatlan marad, miközben a körülöttük lévő fémes mátrix fokozatosan korróziós termékekké alakul. A kialakuló porózus réteg megőrzi az öntvény eredeti geometriáját, ugyanakkor a mechanikai tulajdonságai jelentősen romlanak.

A megfigyelések alapján feltételezhető, hogy a grafitos korrózió előrehaladását az eutektikus cellák szerkezete is befolyásolja. Egy adott eutektikus cellán belül a korrózió a grafitlemezek és a fémes mátrix határfelülete mentén kedvezően terjedhet, míg a szomszédos eutektikus cellába történő átterjedéskor a korróziós front előrehaladása lelassulhat. Ez magyarázatot adhat a korrodált zóna SEM-felvételeken megfigyelhető cellás, egyenetlen morfológiájára.

Az EDS pontanalízisek és elem térképek alapján a korróziós rétegben a vas koncentrációja csökken, míg az oxigén mennyisége növekszik, amely vasban gazdag korróziós termékek kialakulására utal. A karbon elsősorban a grafitlemezekben marad vissza, amely

megerősíti, hogy a grafitos korrózió során elsősorban a fémes mátrix oldódik ki, miközben a grafitváz megmarad. Vizsgálataink eredményei jól illeszkednek Logan [5] grafitos korróziós modelljéhez.

8.2. Az oxigéntranszport és a korróziós termékek szerepe

Szobahőmérséklet közeli körülmények között a vízvezetékek belső felületén kialakuló korrózió sebességét elsősorban az oldott oxigén utánpótlása határozza meg. A lemezgrafitos öntöttvasban az eutektikus cellákon belül kialakuló grafitálózat és a grafit-mátrix határfelületek befolyásolhatják az oxigén és az oldott ionok korróziós zónán belüli transzportját, miközben a grafitlemezek és a vasmátrix között kialakuló lokális galvanikus cellák következtében az anódos oldódás elsősorban a grafitlemezek környezetében zajlik. Logan [5] szerint a grafit-mátrix határfelület nemcsak az elektrokémiai reakciók helyszíne, hanem az oldott ionok számára kedvező transzportútvonalat is biztosít, ami elősegíti a korróziós front előrehaladását. Ez összhangban áll a SEM-felvételeken megfigyelt cellás korróziós morfológiával, és arra utal, hogy az eutektikus cellákon belüli grafitálózat a korrózió lokális terjedési útvonala is befolyásolhatja.

A kialakuló korróziós termékreteg fokozatosan csökkenti az oxigén utánpótlását, ezáltal a korrózió előrehaladási sebessége idővel mérséklődhet. A grafitváz és a pórusteret részben kitöltő korróziós termékek együttesen növelhetik az oxigén befelé irányuló transzportjának diffúziós ellenállását. Ez hozzájárulhat ahhoz, hogy a vizsgált, közel 150 éves öntöttvas csőben a grafitos korrózió elsősorban a felületközelbeli tartományokra korlátozódott.

8.3. A grafitos korrózió mérnöki jelentősége

A SEM-felvételek azt mutatják, hogy a grafitos korrózió mélysége nem egyenletes, hanem lokálisan változó. A legnagyobb anyagvesztés a nagyobb grafitlemez-sűrűségű, rozettás grafitos területeken figyelhető meg, amely összhangban áll Pimenta-Richardson [6] megállapításaival, miszerint a grafitmorfológia jelentős hatással van a grafitos korrózió előrehaladására.

Az egyenetlen korróziós mélység következtében a csőfal helyenként jelentősen meggyengülhet. Bár a grafitváz és a korróziós termékek miatt az öntvény külső geometriája hosszú ideig változatlan maradhat, a fémes mátrix fokozatos eltűnése jelentősen csökkenti a mechanikai szilárdságot. Ennek következtében a cső fokozottan érzékennyé válhat a külső mechanikai terhelésekre, illetve a belső nyomásváltozásokra, ami hosszú távon repedések vagy törések kialakulásához vezethet [4, 5].

A vizsgálatok azt is igazolják, hogy a grafitos korrózió külső megjelenése nem feltétlenül tükrözi

a szerkezeti károsodás mértékét. Ezért a történeti öntöttvas vízvezetékek állapotának megítélése során a mikroszerkezeti vizsgálatok fontos szerepet játszhatnak a maradó teherbírás és a várható élettartam értékelésében.

A szilícium lokális feldúsulása arra utal, hogy a vas szelektív kioldódásával párhuzamosan a szilícium relatív koncentrációja növekszik a korróziós rétegben. A klór jelenléte alapján klórtartalmú korróziós termékek kialakulása sem zárható ki, amelyek a szakirodalom szerint elősegíthetik az anódos vasoldódást és a grafitos korrózió előrehaladását. Ugyanakkor az EDS-vizsgálat önmagában nem alkalmas a korróziós termékek pontos fázisazonosítására, ezért azok jelenléte csak valószínűsíthető.

9. Következtetések

A jelen munkában egy közel 150 éves szürkeöntöttvas vízvezetékcső grafitos korrózióját vizsgáltuk pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) és energiadiszipatív röntgenspektroszkópia (EDS) alkalmazásával. A vizsgálatok lehetővé tették az eredeti mikroszerkezet, valamint a korrózió során kialakuló szerkezeti és elemi változások részletes elemzését.

A SEM-vizsgálatok igazolták, hogy a grafitos korrózió során elsősorban a grafitlemezeket körülvevő ferrites-perlites mátrix oldódik ki, miközben a grafitlemezek morfológiája nagyrészt változatlan marad. A korróziós folyamat eredményeként porózus, oxidokkal kitöltött réteg alakul ki, amely az öntvény eredeti geometriáját nagyrészt megőrzi, ugyanakkor jelentősen csökkenti annak mechanikai szilárdságát.

Az EDS pontanalízisek és elemterképek alapján megállapítható, hogy a korrodált zónában a vas koncentrációja csökken, míg az oxigén és helyenként a szilícium relatív mennyisége növekszik. A klór lokális jelenléte arra utal, hogy kloridtartalmú közeg is szerepet játszhatott a korróziós folyamat előrehaladásában. Az elemi összetétel alapján feltételezhető, hogy a korróziós termékek között vas-oxidok, vas-oxi-hidroxidok és szilíciumban gazdag oxidfázisok is jelen vannak, ugyanakkor ezek pontos fázisazonosításához további vizsgálatok (pl. XRD- vagy Raman-spektroszkópia) szükségesek.

A vizsgálatok eredményei összhangban vannak a grafitos korrózió szakirodalomban ismertett mechanizmusával, amely szerint a grafitlemezek katódként, míg a ferrites-perlites mátrix anódként viselkedik. A SEM-felvételeken megfigyelhető cellás korróziós morfológia alapján feltételezhető, hogy a grafitos korrózió lokális előrehaladását az

eredeti eutektikus cellaszerkezet is befolyásolja: a korrózió az egyes cellákon belüli grafit-mátrix határfelületek mentén kedvezően terjedhet, míg a szomszédos eutektikus cellákba történő áttérjedése lassulhat. A korrózió mélysége a vizsgált mintában nem volt egyenletes; a legnagyobb anyagvesztés a nagyobb grafitlemez-sűrűségű területeken volt megfigyelhető. Ez a lokális falvékonyodás hosszú távon kedvezőtlenül befolyásolhatja a történeti öntöttvas csővezetékek mechanikai teherbírását és üzembiztonságát.

A bemutatott vizsgálati módszer alkalmas a történeti öntöttvas csővezetékek korróziós állapotának részletes mikroszerkezeti értékelésére. Az eredmények hozzájárulhatnak a grafitos korrózió mechanizmusának jobb megértéséhez, valamint a még üzemelő történeti öntöttvas vízvezetékek állapotfelméréséhez, maradó élettartamának becsléséhez és a felújítási stratégiák megalapozásához.

Irodalom

- [1] Campbell J. W. P.: The development of water pipes: A brief introduction from ancient times until the industrial revolution. Proceedings of the Eighth Annual Conference of the Construction History Society, Queens' College, Cambridge, UK, 2021, pp. 33–45.
- [2] Martin P.-D.: Vue de la Machine de Marly. Musée du Louvre, Département des Peintures, 1724. Forrás: Louvre Collections.
- [3] Fővárosi Vízművek Zrt.: A budapesti vízellátás története. Elérhető: <https://www.vizmuvek.hu> (letöltve: 2026. július 29.).
- [4] Jur T. A., Middleton J. I., Yurko A. A., et al.: Case studies in graphitic corrosion of cast iron pipe. Journal of Failure Analysis and Prevention, 21 (2021), 376–386. <https://doi.org/10.1007/s11668-020-01097-0>
- [5] Logan R.: The graphitic corrosion of cast iron: Aspects on the deterioration of trunk main. PhD Thesis, University of Surrey, Guildford, United Kingdom, 2016.
- [6] Pimenta-Richardson J.: Graphitic corrosion of grey cast iron wastewater and microstructural studies. PhD Thesis, University of Surrey, 2022.
- [7] Lacaze J., Dawson S., Hazotte A.: Cast Iron: A historical and green material worthy of continuous research. International Journal of Technology, 12(6) (2021), 1123–1138. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v12i6.5235>
- [8] Tewary U., Paul D., Mehtani H. K., et al.: The origin of graphite morphology in cast iron. Acta Materialia, 226 (2022), 119660. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.117660>
- [9] Káldor Mihály: Fizikai metallurgia. Magyar Vas- és Acélipari Egyesülés – Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1990.

Mesterséges intelligencia az alginitkutatás szolgálatában – Egy elfeledett magyar nyersanyag újraértelmezése a klímaadaptáció és a vízmegtartás tükrében

Artificial intelligence in alginite research – Reinterpreting a forgotten Hungarian mineral resource for climate adaptation and water retention

BOROS ÁKOS

geológus, földtudományi mérnök

Mhyner Geoconsulting Kft., Kecskemét

E-mail: a.boros@mhyner.com



A klímaváltozás, a fokozódó vízhiány és a fenntartható mezőgazdasági megoldások iránti növekvő igény világszerte újra előtérbe helyezi a természetes talajjavító anyagok kutatását. Az alginit hazai lelőhelyei az 1970-es és 1990-es évek között intenzív kutatások tárgyát képezték, azonban a vizsgálatok eredményei nagyrészt papíralapú dokumentumokban maradtak fenn, amelyek feldolgozása és szintetizálása napjainkban jelentős kihívást jelent.

A jelen tanulmány bemutatja, hogyan alkalmazható egy mesterséges intelligenciával támogatott, retrieval-augmented generation (RAG) alapú tudásbázis az alginittel kapcsolatos történeti szakirodalom digitalizálására, rendszerezésére és gyors újra értelmezésére. A vizsgálat során mintegy 120 magyar, német, szlovák és angol nyelvű dokumentum került feldolgozásra és egységes kereshető tudásbázisba rendezésre.

Az AI-alapú elemzés lehetővé tette a különböző kutatási eredmények gyors szintézisét, az ismétlődő következtetések azonosítását, valamint olyan új kutatási és hasznosítási lehetőségek feltárását, amelyek a jelenlegi klímaadaptációs és vízmegtartási célok szempontjából kiemelt jelentőségűek lehetnek. A tanulmány rámutat arra, hogy a mesterséges intelligencia nem helyettesíti a szakértői értékelést, ugyanakkor hatékony eszközt biztosít nagy mennyiségű történeti földtani szakirodalom feldolgozásához és a kutatási döntések támogatásához.

Kulcsszavak: alginit, mesterséges intelligencia, tudásbázis, RAG, digitális szakirodalom, klímaadaptáció, vízmegtartás, talajjavítás, földtani kutatás

Climate change, increasing water scarcity, and the growing demand for sustainable agricultural solutions have renewed interest in natural soil amendment materials worldwide. Hungarian alginite deposits were extensively investigated between the 1970s and 1990s; however, most research results remain archived in hard-copy reports, making their comprehensive evaluation difficult.

This paper presents the application of an artificial intelligence-supported Retrieval-Augmented Generation (RAG) knowledge base for the digitization, organization, and reinterpretation of archived alginite literature. Approximately 120 Hungarian, German, Slovak, and English documents were processed and integrated into a unique searchable knowledge base.

The AI-assisted analysis enabled rapid synthesis of decades of research, identification of recurring scientific findings, and recognition of promising research and industrial opportunities relevant to present-day climate adaptation and agricultural water retention. The study demonstrates that while artificial intelligence cannot replace expert geological interpretation, it can significantly accelerate literature review, support scientific synthesis, and facilitate the identification of new research directions based on historical geological knowledge.

Keywords: alginite, artificial intelligence, knowledge base, Retrieval-Augmented Generation (RAG), digital geological literature, climate adaptation, water retention, soil amendment, geological research

1. Bevezetés

Az elmúlt években a klímaváltozás hatásai Magyarországon is egyre markánsabban jelentkeznek. A gyakoribb és hosszabb aszályos időszakok, a talajok csökkenő vízkészlete, valamint a felszíni vizek alacsony vízállása egyaránt ráirányították a figyelmet a vízmegtartás jelentőségére. A mezőgazdaság alkalmazkodóképességének növelése érdekében egyre nagyobb hangsúlyt kapnak azok a természetes talajjavító anyagok és technológiák, amelyek képesek javítani a talaj szerkezetét, vízháztartását és tápanyag-szolgáltató képességét.

A hazai alginitlelőhelyek intenzív kutatása a 20. század második felében, különösen az 1970–1990-es években zajlott, amelynek során jelentős mennyiségű földtani, ásványtani, kémiai és egyéb alkalmazhatósági vizsgálat született. A kutatások ugyan számos ígéretes eredményt hoztak, azonban ezek többsége nyomtatott jelentésekben, kutatási beszámolóknak és nehezen hozzáférhető archív dokumentumokban maradt fenn. A rendelkezésre álló információk rendszerezése és átfogó értékelése ezért napjainkban is jelentős kihívást jelent.

A mesterséges intelligencián alapuló nagy nyelvi modellek (*Large Language Models* – LLM) és a *Retrieval-Augmented Generation* (RAG) technológia új lehetőséget kínálnak nagyméretű, heterogén szakirodalmi gyűjtemények feldolgozására. Segítségükkel nemcsak a dokumentumok gyors keresése és összefoglalása válik lehetővé, hanem a különböző forrásokban megjelenő összefüggések, ismétlődő megállapítások és kutatási hiányosságok feltárása is.

A jelen tanulmány célja, hogy bemutassuk egy saját fejlesztésű, RAG-alapú digitális tudásbázis létrehozását és alkalmazását az alginít kutatásában. A dokumentum alapú rendszer több mint 120 magyar, német, szlovák és angol nyelvű szakmai anyag egységes feldolgozására és mesterséges intelligenciával támogatott elemzésére épül. A bemutatott módszertan azt szemlélteti, hogy az archivált földtani szakirodalom miként tehető újra kutathatóvá, illetve hogyan értelmezhető újra annak eredményei a jelenlegi klímaadaptációs és vízmegtartási kihívások tükrében.

2. Anyagok és módszerek

A kutatás célja egy olyan digitális szakirodalmi tudásbázis létrehozása volt, amely lehetővé teszi a magyarországi alginít kutatás több évtized alatt felhalmozott eredményeinek egységes feldolgozását, kereshetőségét és mesterséges intelligenciával támogatott elemzését.

A munka során elsődleges célként a történeti szakirodalom digitalizálása és rendszerezése, valamint egy olyan módszertan kialakítása szerepelt, amely jelentősen felgyorsítja a szakirodalmi áttekintéseket, az összefüggések feltárását és az új kutatási irányok azonosítását. A feldolgozás során különös figyelmet fordítottunk arra, hogy az AI-alapú elemzés minden esetben az eredeti dokumentumokra épüljön, és azok szakmai tartalmát a lehető legteljesebb mértékben megőrizze.

A módszertan négy egymásra épülő lépésből állt:

- ❑ a történeti szakirodalom összegyűjtése és digitalizálása,
- ❑ kereshető digitális tudásbázis létrehozása,
- ❑ mesterséges intelligenciával támogatott szakirodalmi elemzés,
- ❑ szakértői validálás és az eredmények értelmezése.

2.1. A szakirodalmi dokumentumgyűjtemény összeállítása

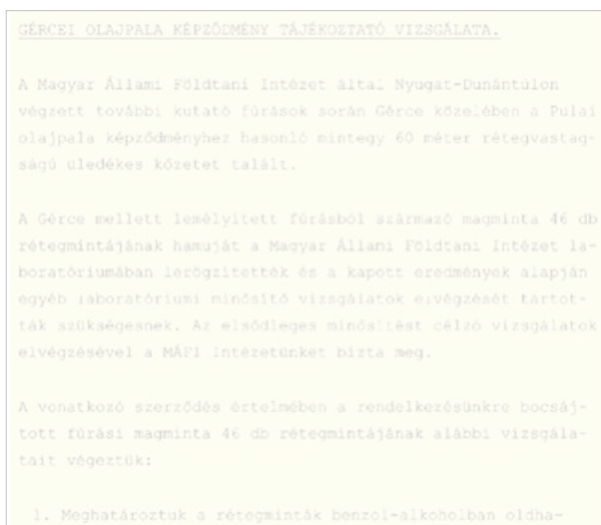
A kutatás alapját egy több mint 500 tételből válogatott 120 dokumentumból álló szakirodalmi gyűjtemény képezte, amely a magyarországi és régiós alginít kutatás elmúlt évtizedeinek jelentős részét lefedi.

Az adatgyűjteményt jelenleg a Miskolci Egyetem kezeli, a dokumentumok különböző forrásokból kerültek összegyűjtésre, és elsősorban az 1960-as évektől kezdődően készített kutatási jelentéseket, laboratóriumi vizsgálatokat, geológiai dokumentációkat, diplomamunkákat, szakmai publikációkat és egyéb műszaki anyagokat tartalmaznak. A gyűjtemény magyar, német, szlovák és angol nyelvű dokumentumokat egyaránt magában foglal, így lehetővé vált a különböző országokban végzett kutatások összehasonlító elemzése is.

A feldolgozott dokumentumok tematikája kiterjed többek között:

- ❑ az alginít földtani és genetikai viszonyaira,
- ❑ ásványtani, geokémiai és fizikai tulajdonságaira,
- ❑ mezőgazdasági alkalmazásaira,
- ❑ talajjavító és vízmegtartó hatására,
- ❑ ipari, energetikai és vegyipari hasznosítására,
- ❑ környezetvédelmi alkalmazási lehetőségeire,
- ❑ valamint a különböző laboratóriumi és félüzemi kísérletek eredményeire.

A dokumentumállomány jelentős része korábban kizárólag papíralapú formában, rossz minőségű másolatokként volt hozzáférhető, ezért a kutatás első lé-



1. ábra. Dokumentumrészlet

péseként azok digitalizálása és egységes feldolgozása vált szükségessé. Egy ilyen dokumentum részlete látható az 1. ábrán.

2.2. Digitalizálás és optikai karakterfelismerés (OCR)

A nyomtatott, illetve korábbi digitális archiválásból származó, de nem kereshető PDF dokumentumok hagyományos szövegkereső módszerekkel nem voltak feldolgozhatók. Első lépésként azok digitalizálása és géppel olvasható szöveges állománnyá alakítása vált szükségessé. Az archivált dokumentumok szkennelésének és OCR-alapú digitalizálásának jelentős részét a Miskolci Egyetem és az Egyetemi Könyvtár végezte, amelynek eredményeként a korábban csak papíralapon vagy képfarmátumú digitális állományként hozzáférhető szakirodalom bevonhatóvá vált az AI-alapú feldolgozásba.

A feldolgozás során valamennyi dokumentum optikai karakterfelismerésen (*Optical Character Recognition* – OCR) esett át, amelynek célja a dokumentumok géppel olvasható szövegének előállítása volt. A folyamat során különös figyelmet fordítottunk arra, hogy a szöveg szerkezete, a táblázatok, ábracímek, mértékegységek és a műszaki terminológia a lehető legnagyobb pontossággal kerüljön megőrzésre.

Mivel a gyűjtemény több évtized alatt, különböző intézményekben készült dokumentumokat tartalmaz, a forrásanyag minősége jelentősen eltért. Az eredeti dokumentumok között megtalálhatók voltak gépelt jelentések, sokszorosított kutatási beszámolók, fénymásolatok, valamint különböző minőségű szkennelt állományok is. Ennek megfelelően az OCR eredményei dokumentumonként eltérő pontosságot mutattak.

A digitalizálást követően minden dokumentum manuális minőség ellenőrzésen esett át. A szakmai-

lag kritikus részeket – különösen a földtani megnevezések, ásványnevek, mértékegységek, táblázatok és számszerű adatok – szükség szerint javítottuk.

A folyamat eredményeként egységes, kereshető, digitális dokumentumállomány jött létre.

2.3. A RAG-alapú tudásbázis kialakítása

A digitalizált dokumentumállomány feldolgozására saját, felhőalapú környezetben működő, *Retrieval-Augmented Generation* (RAG) [1] elven felépített tudásbázist hoztunk létre. A rendszer dokumentumkezelési és lekérdezési környezetét az AnythingLLM [2] biztosította, míg a dokumentumok szemantikus kereséséhez szükséges vektoros reprezentációk tárolása PostgreSQL-alapú pgvector adatbázisban [3] történt.

A dokumentumok szöveges tartalma kisebb, szemantikailag kezelhető egységekre került felosztásra. Az egyes szövegrészletekből API-kapcsolaton keresztül OpenAI embedding modell segítségével vektorreprezentációk készültek, amelyek a pgvector adatbázisban kerültek tárolásra. Ez lehetővé tette, hogy a rendszer a felhasználói kérdésekhez ne kizárólag kulcsszavas egyezést alapján, hanem a szövegek tartalmi hasonlósága alapján keresse vissza a releváns dokumentumrészleteket.

A lekérdezések során a RAG-rendszer első lépésben azonosította a kérdéshez szemantikailag leginkább kapcsolódó dokumentumrészleteket, majd ezeket kontextusként továbbította a nagy nyelvi modell számára. A generált válasz így elsősorban a saját tudásbázisban szereplő szakirodalmi forrásokra támaszkodott, miközben az eredeti dokumentumok visszakereshetősége is megmaradt.

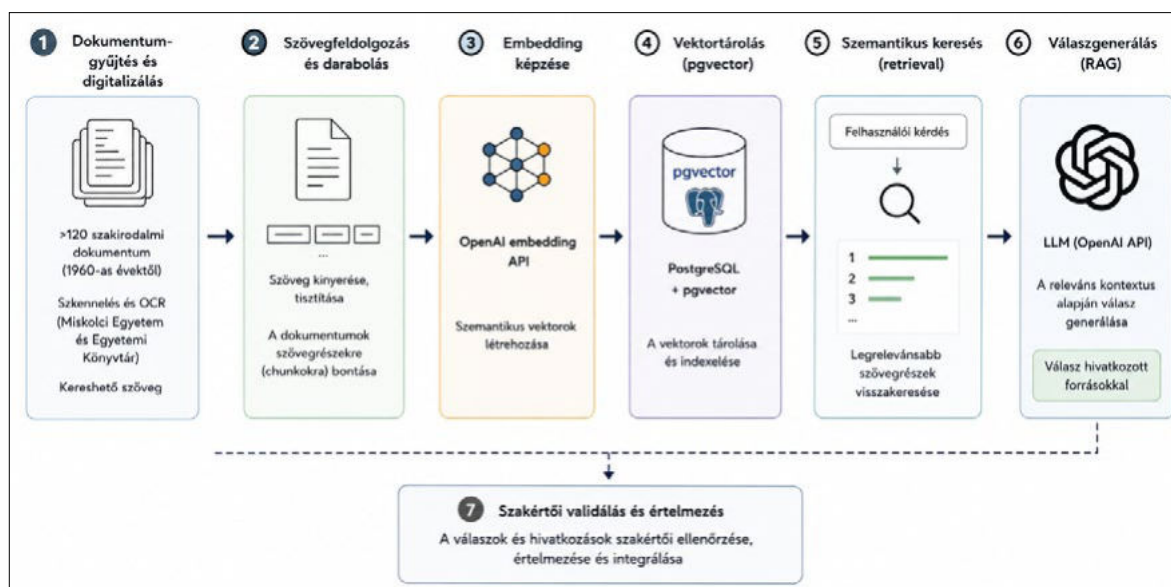
A megközelítés lényeges sajátossága, hogy a nagy nyelvi modellt nem került külön betanításra vagy finomhangolásra, a szakterületi tudást a külső dokumentumállomány és annak szemantikus visszakeresése biztosította. Ez lehetővé teszi a tudásbázis folyamatos bővítését új dokumentumokkal anélkül, hogy ehhez a nyelvi modell újra tanítására lenne szükség.

A tudásbázis kialakításának folyamatát a 2. ábrán mutatjuk be.

2.4. AI-alapú szakirodalmi elemzés és tudásszintézis

A létrehozott digitális tudásbázis segítségével a nagy nyelvi modellre épülő rendszer nem egyszerűen dokumentumokat keresett vissza, hanem a releváns források alapján szakirodalmi szintézist készített.

Az elemzések során különböző típusú lekérdezések készültek, amelyek célja nem egyetlen dokumentum tartalmának összefoglalása, hanem a teljes szakirodalom közös értelmezése volt. A kérdések többek között az alábbi témakörökre irányultak:



2. ábra. A dokumentumalapú RAG rendszer és működési folyamata

- ❑ az alginit földtani és ásványtani sajátosságai,
- ❑ a különböző lelőhelyek összehasonlítása,
- ❑ mezőgazdasági és környezetvédelmi alkalmazások,
- ❑ ipari és energetikai hasznosítási lehetőségek,
- ❑ a korábbi kutatásokban ismétlődően megjelenő következtetések,
- ❑ a különböző szerzők közötti egyetértések és eltérések,
- ❑ valamint a jelenlegi technológiai és gazdasági környezetben potenciálisan újra relevánssá váló kutatási irányok.

A lekérdezések megfogalmazásánál kiemelt szempont volt, hogy a különböző dokumentumok közötti kapcsolatok feltárására, az ismétlődő eredmények azonosítására és a szakirodalomban rejlő kutatási lehetőségek értékelésére törekedjen. Ennek megfelelően a válaszok review jellegű szakmai összefoglalásokként készültek el.

A mesterséges intelligencia alkalmazása jelentősen csökkentette a nagyméretű dokumentumállomány feldolgozásához szükséges időt. Olyan összetett kérdések megválaszolása, amelyek hagyományos szakirodalmi feldolgozás esetén több napos vagy akár több hetes munkát igényeltek volna, néhány perc alatt elvégezhetővé váltak, miközben minden válasz közvetlenül a feltöltött dokumentumállományra támaszkodott.

A rendszer alkalmazása során ugyanakkor egyértelművé vált, hogy a mesterséges intelligencia nem helyettesíti az emberi beavatkozást, azaz a földtani szakértőt. Az AI elsődleges szerepe a releváns információk gyors feltárása, rendszerezése és szintézise, míg a tudományos következtetések levonása, az eredmények értelmezése és azok gyakorlati alkalmazhatóságának megítélése továbbra is szakértői feladat marad.

A kapott válaszok minőségét jelentős mértékben befolyásolta a lekérdezések (promptok) szakmai megfogalmazása. A tapasztalatok alapján a megfelelően strukturált kutatási kérdések legalább akkora hatással

1. táblázat. Az AI-rendszerrel végzett tipikus lekérdezések

Lekérdezés típusa	Példa a kutatási kérdésre	Az elemzés célja/eredménye
Összefoglalás	Az alginit főbb tulajdonságai	A földtani, ásványtani, geokémiai és fizikai tulajdonságok szintézise
Összehasonlítás	Milyen különbségek azonosíthatók a Pula–Gérce–Várpalota lelőhelyek között?	A lelőhelyek tulajdonságainak és lehetséges alkalmazásainak összevetése
Tematikus áttekintés	Mit mutatnak a korábbi kutatások az alginit mezőgazdasági alkalmazásairól?	Több évtized mezőgazdasági kísérleteinek és eredményeinek összegzése
Kritikai elemzés	Mely korábbi kutatási irányok nem vezettek gyakorlati hasznosításhoz?	Gazdasági, technológiai vagy környezeti korlátok miatt háttérbe szorult irányok azonosítása
Újra értelmezés	Mely korábbi eredmények lehetnek napjainkban ismét relevánsak?	Történeti eredmények értékelése a mai klímadaptációs és fenntarthatósági célok alapján
Stratégiai elemzés	Mely alkalmazási területek indokolhatnak további kutatást napjainkban?	Potenciális új kutatási és hasznosítási irányok azonosítása

voltak az eredmények minőségére, mint maga a használt nyelvi modell.

2.5. Az AI-alapú elemzés korlátjai és szakértői validálása

A nagy nyelvi modellek alkalmazása a földtudományi kutatásban számos előnyt kínál, ugyanakkor használatuk korlátjainak ismerete elengedhetetlen. A rendszer által generált válaszok nem tekinthetők önálló tudományos eredménynek, hanem a feltöltött szakirodalom mesterséges intelligenciával támogatott szintézisének.

A *Retrieval-Augmented Generation* (RAG) alkalmazása jelentősen csökkenti annak valószínűségét, hogy a modell a rendelkezésre álló dokumentumoktól független, nem megalapozott állításokat fogalmazzon meg. Ennek ellenére előfordulhatnak pontatlanságok, túlzott általánosítások vagy olyan következtetések, amelyek részben már a modell saját értelmezését tükrözik.

A kutatás során ezért minden lényeges megállapítás szakértői ellenőrzésen esett át. Az AI által készített összefoglalók és elemzések összevetésre kerültek az eredeti dokumentumokkal, különös figyelmet fordítva a földtani, ásványtani, geokémiai és alkalmazástechnikai következtetésekre.

A validálási folyamat során az AI elsődleges szerepe nem a szakértői döntések kiváltása, hanem azok támogatása volt. A végső szakmai értékelést és a kutatási következtetések levonását azonban minden esetben földtudományi szakértők végezték.

3. Eredmények

Az AI-alapú szakirodalmi szintézis alapján kirajzóldtak az alginít kutatás több évtizeden keresztül vizsztatérő tématerületei, valamint az egyes alkalmazási irányok időbeli változásai. Az előzetes leválogatást tükrözve, különösen jól elkülöníthetővé váltak a korábbi energetikai és ipari célú vizsgálatok, illetve a mezőgazdasági, talajjavítási és környezetvédelmi felhasználásokkal kapcsolatos kutatások.

Az elemzés egyik legfontosabb eredménye annak felismerése volt, hogy több korábbi kutatási eredmény a megváltozott technológiai, környezeti és gazdasági feltételek között új jelentőséget kaphat. A történeti szakirodalomban dokumentált talajjavító, vízmegtartó és adszorpciós tulajdonságok különösen a jelenlegi klímaadaptációs, fenntartható mezőgazdasági és környezetvédelmi kihívások szempontjából bizonyultak újraértékelésre érdemesnek.

3.1. A RAG-alapú tudásbázis és az általános célú LLM-alapú elemzés összehasonlítása

Egy általános célú nagy nyelvi modell az alginittel kapcsolatos kérdések megválaszolásakor elsősorban a

betanítása során megszerzett általános ismeretekre támaszkodik. Egy vagy néhány dokumentum közvetlen rendelkezésre bocsátása ezt kiegészítheti az adott források tartalmával, azonban az elemzés ebben az esetben szükségyszerűen a rendelkezésre bocsátott dokumentumokra korlátozódik. Nagy méretű történeti dokumentumállomány esetén ezért külön problémát jelent a releváns forrásrészek azonosítása és több, egymástól független dokumentumban található információ együttes értelmezése.

A jelen kutatásban kialakított RAG-rendszer ezzel szemben a felhasználói kérdés alapján először szemantikus keresést végez a teljes dokumentumkorpusz vektoros reprezentációjában. A rendszer az így azonosított releváns dokumentumrészleteket biztosítja kontextusként a nagy nyelvi modell számára, amely ezek alapján készíti el a választ. A megközelítés célja ezáltal nem egy eltérő vagy speciálisan alginít kutatásra betanított nyelvi modell létrehozása, hanem az általános célú LLM összekapcsolása egy ellenőrzött, szakterületi tudásbázissal.

A két megközelítés közötti különbség szemléltetésére azonos alginít-specifikus kutatási kérdések használhatók általános LLM-környezetben, egyedi dokumentumalapú elemzés során, valamint a teljes RAG-alapú tudásbázis lekérdezésével. Az összehasonlítás során elsősorban a válaszok szakmai specifikussága, forráshűsége, a felhasznált források visszakereshetősége, több dokumentum eredményeinek együttes kezelése, valamint az egyező és eltérő szakirodalmi megállapítások felismerése értékelhető.

Példaként alkalmazható az alábbi kutatási kérdés:

„Milyen bizonyítékok találhatók az alginít talaj-vízmegtartásra gyakorolt hatására, és milyen korlátjai vannak a rendelkezésre álló eredményeknek?”

Egy ilyen kérdés megválaszolása nem kizárólag egyetlen szakirodalmi adat visszakeresését igényli, hanem különböző időszakokban, eltérő vizsgálati módszerekkel készült kutatások eredményeinek együttes értelmezését. Ezért alkalmas lehet annak vizsgálatára, hogy a dokumentumalapú RAG-megközelítés milyen hozzáadott értéket jelent az általános célú LLM-alapú elemzéshez képest.

Az összehasonlítás célja nem annak meghatározása, hogy melyik nyelvi modell tekinthető általánosságban „jobbna”, hanem annak vizsgálata, hogy egy ellenőrzött, szakterületi dokumentumkorpusz és a hozzá kapcsolódó szemantikus visszakeresési rendszer milyen mértékben javíthatja a történeti földtudományi szakirodalom kutatási célú feldolgozhatóságát.

3.2. Az alginít alkalmazási lehetőségeinek szakirodalmi szintézise

A teljes dokumentumállományon végzett tematikus lekérdezések alapján az alginít kutatásában több, egy-

„Milyen bizonyítékok találhatók az alginít talaj-vízmeztartásra gyakorolt hatására, és milyen korlátjai vannak a rendelkezésre álló eredményeknek?”	
Általános LLM (pl. Chatgtp, Claude, Gemini...)	Saját RAG
Az alginít finom agyagásvány- (pl. montmorillonit) és humusztartalmának köszönhetően saját tömegének többszörösét képes vízből felvenni. A tudományos és gyakorlati tapasztalatok alapján a leglátványosabb vízmeztartó hatást laza homoktalajokon éri el, ahol csökkenti az elszívargást és megnöveli a növények számára elérhető vízkészletet. A rendelkezésre álló eredmények egyik fő korlátja, hogy amúgy is kötött, agyagos talajokon rontja a levegőzöttséget és tovább tömörítheti a szerkezetet. Szántóföldi léptékű alkalmazását nehezíti, hogy a látható hatáshoz szükséges nagy mennyiség miatt a szállítási és kijuttatási költségei igen magasak. Emellett önmagában nem helyettesíti a talajtakarást, így a felszíni párolgást és a kiszáradást nem képes önállóan megakadályozni.	A dokumentumok alapján például a pulai alginitet homoktalajokon alkalmazva laboratóriumi kísérletekben a vízmeztartó képesség 20–40%-kal nőtt a kontrollhoz képest, amit Farkas (1986) és Solti (2013) is megerősített. Szántóföldi kísérletekben a kezelt területen a kukorica terméshozama aszályos évben akár 30%-kal is meghaladta a kezeletlen kontrollét, aminek oka a jobb vízellátottság volt (Magyar Mezőgazdaság, 1986). Gércei alginít felhasználásával végzett vizsgálatok szerint a talajnedveség 15–25%-kal magasabb maradt a tenyészidőszak végén, mint a kezeletlen mintákban. Ugyanakkor az egyes helyszíneken (pl. kötöttebb, agyagosabb talajokon) az alginít vízmeztartó hatása kisebbnek bizonyult, és túlzott adagolás esetén a talaj szerkezete tömörödhetett, romlott a levegőzöttség. Hiányoznak továbbá a hosszú távú, többéves és nagyüzemi tapasztalatok, így a jelenlegi bizonyítékok főként rövid távú, kisméretű kísérletekből származnak.

mástól részben eltérő alkalmazási irány különíthető el. A szakirodalmi szintézis azt mutatta, hogy az egyes felhasználási lehetőségek jelentősége az elmúlt évtizedek során változott: míg a korábbi kutatásokban az energetikai és egyes ipari alkalmazások is hangsúlyosan megjelentek, a mezőgazdasági, talajjavítási és környezetvédelmi felhasználások több időszakban és különböző forrásokban is visszatérő kutatási témát jelentettek.

A feldolgozott dokumentumok alapján az egyik legkövetkezetesebben megjelenő alkalmazási terület a mezőgazdasági talajjavítás. Az alginít szervesanyag-, agyagásvány-, valamint makro- és mikroelem-tartalmához kapcsolódóan számos vizsgálat foglalkozott a talaj fizikai és kémiai tulajdonságaira gyakorolt hatásával. A korábbi kutatásokban többek között a talajszerkezet javítása, a tápanyagok megkötése és fokozatos hozzáférhetősége, valamint a növénytermesztésben történő alkalmazhatóság jelent meg visszatérő vizsgálati irányként.

A mezőgazdasági alkalmazásokon belül különösen jelentős témakörként azonosítható a talaj vízháztartására gyakorolt hatás. A különböző időszakokban készült dokumentumokban ismétlődően megjelennek az alginít finomszemcsés szerkezetével, agyagásvány- és szervesanyag-tartalmával, valamint vízmegekötő tulajdonságaival kapcsolatos megfigyelések. Ezek együttes értelmezése alapján a vízmeztartás nem önálló, újonnan felmerült alkalmazási lehetőség, hanem olyan korábban is vizsgált tulajdonság, amely a jelenlegi klímaadaptációs kihívások következtében új jelentőséget kaphat.

A szakirodalmi szintézis másik elkülöníthető területét a környezetvédelmi alkalmazások jelentették. Az alginít adszorpció és ioncserélő tulajdonságai alap-

ján a korábbi kutatásokban felmerült természetes adszorbensként, szűrőanyagként, illetve különböző környezetvédelmi technológiák komponenseként történő alkalmazása. A dokumentumok együttes elemzése alapján ezek az eredmények indokolhatják az alginít vízkezelési, talajvédelmi és rekultivációs célú felhasználásának korszerű módszerekkel történő további vizsgálatát.

Az ipari alkalmazások ennél heterogénebb képet mutattak. A történeti dokumentumok többek között energetikai, vegyipari és egyéb ásványi nyersanyagként történő hasznosítási lehetőségeket is vizsgáltak. Egyes korábbi kutatási irányok a technológiai vagy gazdasági feltételek miatt nem vezettek széles körű gyakorlati alkalmazáshoz. Ezek jelenlegi megítélése ezért nem kizárólag a korábbi műszaki eredmények alapján végezhető el, hanem figyelembe kell venni a technológiai fejlődést, a megváltozott nyersanyagpiaci viszonyokat és a környezeti szempontok növekvő jelentőségét is.

A szakirodalom AI-alapú szintézisének fontos eredménye, hogy a korábban elkülönülten vizsgált tulajdonságok és felhasználási lehetőségek egységes értelmezési keretbe kerültek.

A korábbi eredmények jelenlegi relevanciájának megítéléséhez ugyanakkor további szakértői értékelés, valamint egyes alkalmazások esetében korszerű laboratóriumi, terepi és gazdaságossági vizsgálatok szükségesek. A 3. ábrát az RAG által támogatott AI-áttekintések alapján állítottuk össze.

4. Összefoglalás

A kutatás során létrehozott RAG-alapú tudásbázis alkalmazásával a korábban nehezen áttekinthető archi-



3. ábra. Az alginít alkalmazási lehetőségei a szakirodalom szintézise alapján

vált dokumentumállomány kereshető és szemantikus elemezhető tudásforrássá vált.

A RAG-alapú megközelítésnek az általános célú nagy nyelvi modellekhez képest a legfontosabb sajátossága, hogy a válaszgenerálást egy ellenőrzött dokumentumkorpusz szemantikus visszakeresésével kapcsolja össze, miközben lehetőséget biztosít az eredeti forrásokhoz történő visszatérésre és a szakértői validálásra.

A történeti eredmények újra értékelése ma különösen a jelenlegi klímadaptációs kihívások szempontjából lehet jelentős. Az alginít vízmegkötő, talajjavító és adszorpciós tulajdonságaival kapcsolatos korábbi kutatások olyan tudásanyagot képviselnek, amely korszerű laboratóriumi és terepi vizsgálatokkal kiegészítve új kutatási és alkalmazási irányok kiindulópontját jelentheti.

A vizsgálat egyben rámutatott arra is, hogy az AI-alapú szakirodalmi szintézissel olyan összefüggések és kutatási kérdések váltak azonosíthatóvá, amelyek egyetlen dokumentumban sem jelentek meg önálló következtetesként, ugyanakkor több, egymástól független kutatás eredményeinek együttes értelmezéséből levezethetők voltak. Az ilyen következtetések tudományos értékelése és validálása azonban továbbra is szakértői feladat.

Az alginít tudásbázis ma csak egy példa a rendszer hasznosságára. Hasonló RAG-alapú tudásbázisok kialakítása különösen értékes lehet olyan földtudományi területeken, ahol több évtizedes, heterogén és részben nehezen hozzáférhető dokumentáció áll rendelkezés-

re, de korszerű összegzésük nem történt meg. Ilyen lehet például a kritikus ásványi nyersanyagok széles területe, amelynek keretében az SZTFH által 2025-ben kidolgozott Nemzeti Feltérési Program [4] 12 kutatási terület ismereteinek összegzését tűzi ki célként.

A módszer további fejlesztési irányát jelentheti a dokumentumalapú tudásbázis strukturált földtani, geokémiai, laboratóriumi és térbeli adatbázisokkal történő összekapcsolása, amely lehetővé teszi a szakirodalmi és mérési adatok együttes AI-alapú elemzését.

Köszönetnyilvánítás

Dr. Solti Gábor geológus, az alginít kutatás egyik alapítója örízte meg, és végül adományozta az egyetemnek az alginít dokumentum-gyűjteményt. A dokumentumok jó minőségű digitalizálását a Miskolci Egyetem Könyvtár és Adattár szakértői végezték. A Miskolci Egyetem TEKH Szakkollégium Alginít munkacsoportjával való közös munka keretében kaptuk meg a dokumentumokat további feldolgozásra.

Irodalom

- [1] Klesel M., Wittmann H. F.: Retrieval-Augmented Generation (RAG). Bus. Inf. Syst. Eng. 67, 551–561. (2025). <https://doi.org/10.1007/s12599-025-00945-3>
- [2] AnythingLLM – <https://anythingllm.com/>
- [3] PostgreSQL – <https://www.postgresql.org/>
- [4] Nemzeti Feltérési Program – https://hugeo.hu/sites/default/files/2026-07/CRM_HU_Nemzeti%20Felt%C3%A1r%C3%A1si%20Program_v2.pdf

Kérdések és válaszok egy geotermikus koncesszió megvalósításának előkészítése során

Questions and answers when preparing to implement a geothermal concession

ID. ŐSZ ÁRPÁD

E-mail: oszarpad46@gmail.com



Magyarország a magas geotermikus gradiensének köszönhetően kedvező adottságokkal rendelkezik, de a legtöbb hazai hasznosítás alacsonyabb hőmérsékletű. Léteznek azonban nagy entalpiájú tárolók is az ország területén. A nagy entalpiájú geotermikus energia a Föld belső hőjének hasznosítását jelenti olyan rendszerekben, amelyekben a kitermelhető fluidum (víz vagy gőz) magas hőmérsékletű és nyomású. A nagy entalpiájú rendszerek jellemzően 150 °C feletti hőmérsékletűek. Elméleti megfontolások szerint a Pannon-medence mezozoós–paleozoós aljzatában, mélyebb szintben (4-5 km) nagy entalpiájú geotermikus tárolók vannak. A Fábánsebestyén–4. mélyfúrás víz/gőz kitörése látványos gyakorlati alátámasztást adott ennek a nézetnek. A Fábánsebestyén–4. mélyfúrás magas entalpiájú geotermikus tárolót tárt fel a Pannon-medence aljzatában. Az energiahordozó fluidum túlhevített sós víz, amelynek nyomása a hidrosztatikusnál jóval nagyobb. A tároló teljes egészében a töredezett-repedezett medencealjzatban helyezkedik el. A tároló töréses szerkezetét jelentős mértékben tektonikai hatások, oldaleltolódásos zónához tartozó lokális „push-up” folyamat hozta létre. Jelentős lehet a túlnyomásos márgaösszlet által generált természetes hidraulikus repedésrendszer is. Magyarország jórészt kiaknázatlan nagy entalpiájú geotermikus energiakészlete lehetővé teszi áramtermelő geotermikus rendszerek létesítését. A nagy entalpiájú geotermikus energiahasznosítás a hazai szerkezet- és szénhidrogén-kutatások során feltárt aljzati kiemelkedésekre fókuszál.

Kulcsszavak: entalpia, víz/gőz, mélyfúrás, kitörés, kútszerkezet, vízkőképződés, gáztartalom, vízvisszanyomás, kúthasznosítás, kérdés/felelet

Hungary has favorable conditions due to its high geothermal gradient, but most domestic utilization is at lower temperatures. However, there are also high-enthalpy reservoirs in the country. High-enthalpy geothermal energy refers to the utilization of the Earth's internal heat in system where the extractable fluid (water or steam) is at high temperature and pressure. High-enthalpy temperatures above 150°C. According to theoretical considerations, there are high-enthalpy Mesozoic-Paleozoic basement reservoirs of the Pannonian Basin, at a deeper level (4-5 km). The water/steam blow-out of the Fábánsebestyén–4 borehole provided spectacular practical support for this view. The Fábánsebestyén–4 deep borehole revealed a high-enthalpy geothermal reservoir in the basement of the Pannonian Basin. The energy-carrying fluid is superheated saline water, the pressure of which is much higher than hydrostatic one. The reservoir is located entirely in the fractured-cracked basin basement. The fractured structure of the reservoir was significantly created by tectonic effects and a local “push-up” process belonging to a lateral displacement zone. The natural hydraulic fracture system generated by the over-pressured marl assemblage may be significant. Hungary's largely untapped high-enthalpy geothermal energy reserves enable the establishment of electricity-generating geothermal system. The utilization of high-enthalpy geothermal energy focuses on subsurface outcrops discovered during domestic structural and hydrocarbon exploration.

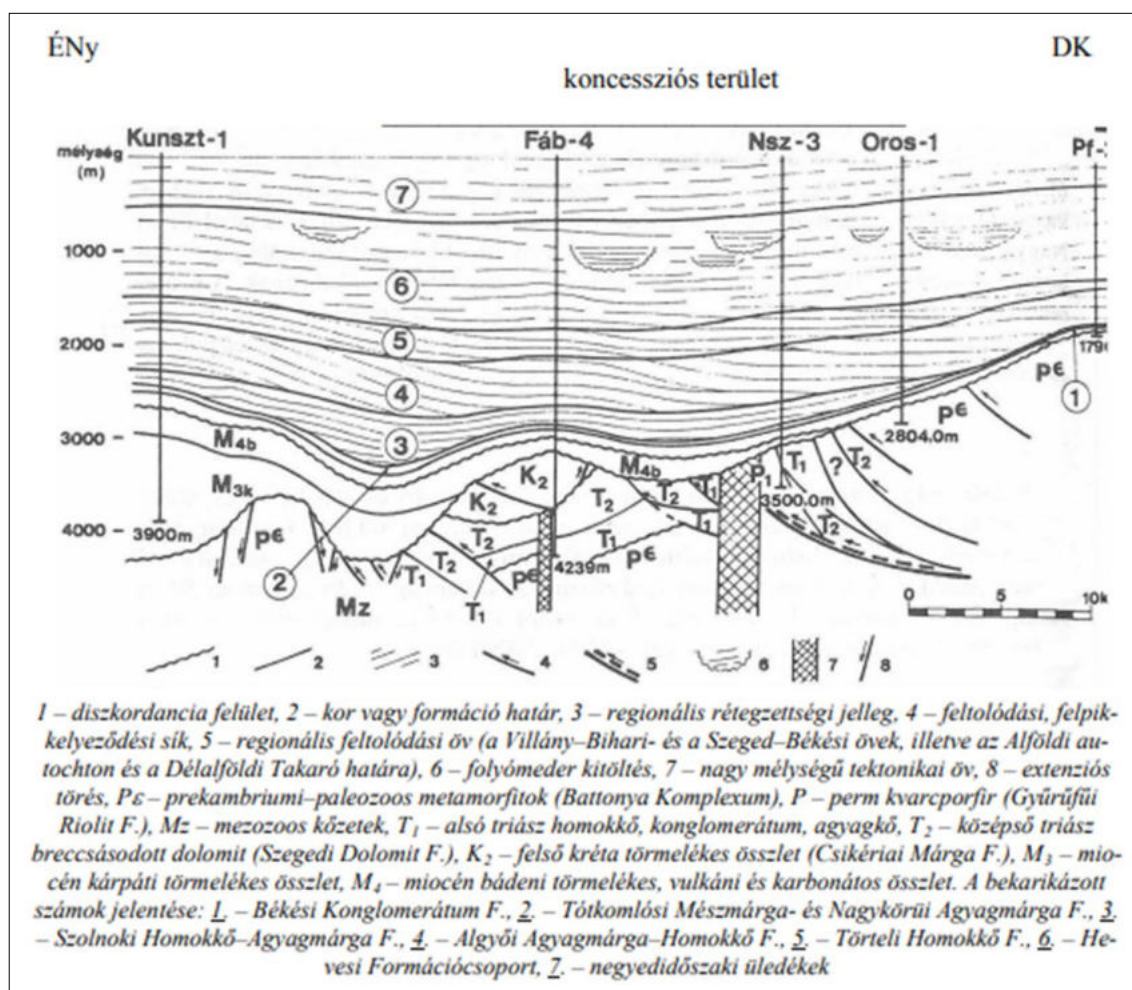
Keywords: enthalpy, water/steam, deep drilling, blowout, well construction, scale formation, gas content, water injection, well utilization, question/answer

Bevezetés

A 2019-es bányászati tenderre benyújtott pályázata alapján Gádoros területére, geotermikus energia kutatására, kinyerésére és hasznosítására meghirdetett kiírás nyertese két szénhidrogén-kutatással és -termeléssel foglalkozó társaság által létrehozott Kft. lett. A geotermikus koncesszió 35 évre szól, ez az időtartam újabb pályázat kiírása nélkül egy alkalommal, a koncessziós szerződés eredeti időtartamának felével meghosszabbítható. A koncessziós területen található a magyarországi mély szintű szénhidrogén-kutatás és nagy entalpiájú geotermikus energia két rendkívül fontos és meghatározó fúrása, illetve kútja, a Fáb-4. (Fáb-4.) és a Nagyszénás-3. (Nsz-3.) (1. ábra).

Magyarországon az 1909. és 2025. évek között bekövetkezett 81 kőolaj-, földgáz-, szén-dioxid-, hévíz- és gőzkitörések közül a 68. volt az 1985. december 16. és 1986. január 31. között zajlott Fáb-4. kutatófúrás kitörése. A magyarországi nagy mélységű szénhidrogén-kutatási program keretében a Világbanktól felvett kölcsönből mélyítette a Kőolajkutató Vállalat a Fáb-4. kutatófúrást. A fúrás mélyítése során 4239 m-ig 2 fűrőlyukegyensúly-meg-

bomlás volt (3733 m, 3795 m), amelyeket sikeresen helyreállítottak. A 4239 m talpmélységnél fűrőcsere céljából megkezdték a fűrőszár kiépítését. 1985. december 16-án 4 órakor, amikor már csak 1 db 7^{5/8}”-es fűrő és 3 db 6^{3/4}”-es súlyosbító volt a fűrőlyukban, ismét fűrőlyukegyensúly-megbomlás lépett fel és a lyukszájon túlfolyás jelentkezett. A munkapadon dolgozóknak még volt annyi idejük, hogy 1 szál 5”-es méretű fűrőcsővel, a tetején lévő biztonsági tolózárral, a fűrőlyukat lezárják. Amikor a lefűtató-rendszert is lezárták, a lyukfejen kialakult nyomás a fűrőszerszámot felfelé tolta addig, amíg a fűrőcső kapcsolója a kitörésgátló betéteket el nem érte. Ez a mozgás igen gyors és nagy erejű volt, mert a tolózár a szállítóhorognak ütközve letört, s így a súlyosbítókon és a fűrőcsővön keresztül a kiáramlás szabaddá vált. A fűrőiszap kiáramlása olyan erős volt, hogy a munkapadon már nem lehetett a kitörésgátló működtető pultját kezelni, ezért a főfűrőmester a betonlapon lévő távműködtetőhöz ment, hogy onnan kísérelje meg a szerszám fűrőlyukba ejtését. A kinyitási kísérlet közben a kitörő fűrőiszap a szerszámot kilökte a fűrőlyukból, a súlyosbító három darabra tört. Ezek közül kettő a gépház tetejét áttörve a betonlapba állt, a harmadik a



1. ábra. Vázlatos földtani metszet a Kunszt-1., Fáb-4., Nsz-3., Oros-1. és Pf-129. fúrásokon keresztül



2. ábra. A gőzkitörés. A piros nyíl mutatja azt a súlyosbítót, amely a főfűrőmester halálát okozta¹

kitörésgátló távműködtető mellé állt a földbe és ott belengve a főfűrőmestert halálosan megsebesítette (2. ábra).

Megkísérelték a kitörésgátlót bezárni, azonban az már nem működött, később derült ki, hogy a belső tengelye eltörtött. 13 óra 30 perckor egy óriási robbanás történt a lyukszájnál, és az egész fűrőberendezés gőzfelhőbe került (3. ábra).



3. ábra. A fűrőberendezés gőzfelhőben

A kitörés hangja félelmetes volt, a sós víz és a gőz felfelé és oldalirányban tört a felszínre. Az oldalirányú

¹ A főfűrőmester Kiss Sándor 1962-ben végzett olajbányászati technikus volt. Ő volt a magyarországi kitörések második halálos áldozata. Az első halálos áldozat Eszenyi Viktor fűrőmester volt, aki az 1953-ban a Mezőkereszt-53. fúrás kitörésekor fulladásos halált szenvedett.

gőzsugár a kitörésgátló működtető eltört tengelyének helyén lépett ki, ahonnan a nyomás tengelycsontot kidobta. A további kitörés-felszámolási folyamatokat a helyszínen működő válságtáb határozta meg. Elsőként a fűrőlyuk eltömődékelését határozták el a lefűvató-vezetéken keresztül, tömedékelő anyagnak gumidarabokat, danamid (poliamid) golyókat, keményfát, parafát, alumíniumhengereket és -kapszulákat használtak. A tömedékelési munkák semmilyen eredményt sem hoztak. Világossá vált, hogy a kitörésgátló cseréje nélkül a kitörést nem lehet felszámolni. A válságtáb – tekintettel a nagy nyomásra, a magas hőmérsékletre és a rossz látási viszonyokra, továbbá a bányamentők testi épségének megőrzésére – úgy döntött, külföldi segítséget vesz igénybe. A Világbank a houstoni (USA, Texas) székhelyű Red Adair Co., kitörésselhárítási társaságot ajánlotta.

Amíg a külföldi szakemberek és eszközök megérkeztek, a kitörés folyamatosan zajlott, közben méréseket, valamint áramlási és hőtechnikai számításokat végeztek. A lyukfejen 360 bar nyomást és a lyukfej-szerelvény külső felületén 160 °C hőmérsékletet mértek. A kitörés alatt hozammérést nem tudtak végezni. A kitermelt forró víz és gőz mennyisége becslések szerint 5000–8000 m³/nap, a számított értéke 8400 m³/nap volt.

1986. január 2-án megérkeztek az amerikai szakemberek, felmérték az addig elvégzett munkát és a kialakult helyzetet, és a mentést irányítóival az alábbi programot dolgozták ki:

1. Ki kell rakni a fűrőárbocból a fűrőcsöveket és súlyosbítókat, le kell szerelni a fűrőberendezést és el kell távolítani a fűrőárbocot.
2. Kitörésgátló cserét kell végrehajtani.
3. Nyomásalatti módszerrel termelőcsövet kell beépíteni.
4. Szabályozott nyomású lyukegyensúly-helyreállítást kell elvégezni.

Az első két lépést 1986. január 26-ig sikeresen végrehajtották, azonban a nyomás alatti termelőcső-beépítés a béléscsőben kialakult vízkölerakodás (teteje 1150 m-ben volt) és a beépítő szerkezet valamennyi gumitömítésének tönkremenetele miatt meghiúsult. Így szabályozott nyomású lyukegyensúly-helyreállítást sem lehetett megvalósítani. Nem maradt más lehetőség – amit a mentést irányítók mindenféleképpen el akartak kerülni –, mint a lyukmegölés.² Ezt a műveletet 1986. január 31-én sikeresen végrehajtott-

² A lyukmegölés a lyukegyensúly-helyreállítás nem szabályozott nyomású módszere, amikor is a fűrőlyukban lévő összes fluidumot (kőolajat, földgázt, vizet vagy ezek elegyét) nagy sűrűségű fűrőiszappal és magas nyomással visszanyomják a rétegbe.

ták és ezzel a 47 napig tartó gigászi küzdelem a természet erejével véget ért (4. ábra).



4. ábra. A gőzkiáramlás a kitörésgátló csere után és a lyukmegelőzés előtt

A fúrást 1987-ben kivizsgálták és szénhidrogénre meddő lett, záró cementdugóval és 700 bar nyomáshatárú karácsonyfával látták el (5. ábra). Azóta néhányan (CEGE Zrt., GeoBlu Kft.) próbálkoztak a kút geotermikus hasznosításával – eredménytelenül.



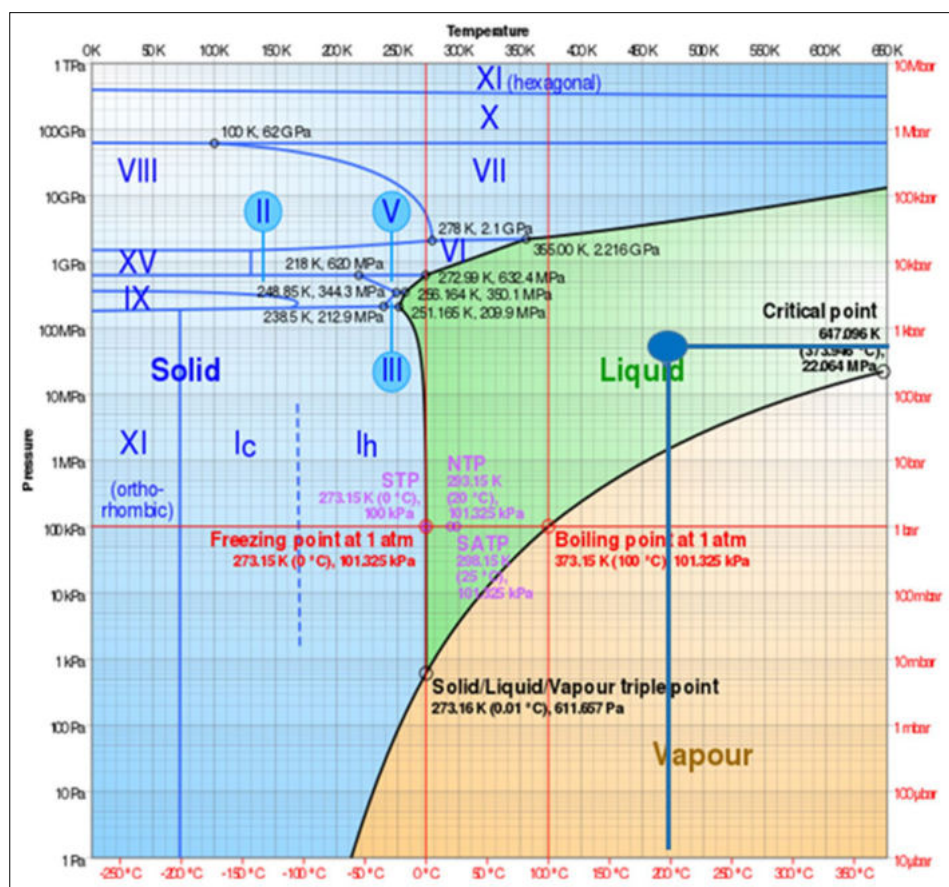
5. ábra. A Fábiánsebestyén-4. kút kútfejszerelvénye a karácsonyfával

Az 1981-ben szénhidrogén-kutatási célból mélyült Nagyszénás-3. fúrás mélyítése után az elsődleges rétegvizsgálatok során a 2922–2935 m közötti szakaszból 16 mm-es fűvókán 295–300 bar nyomással nem mért mennyiségű 105 °C-nál melegebb forró vízgőz-termelést kaptak. 1991-ben viszonylag hosszú idejű rétegvizsgálatot végeztek a tárolókapacitás megállapítására. Az 1981-ben 3500 méterig lefűrt kútban 2,10 kg/dm³ sűrűségű iszappal dolgoztak. 1991-ben végzett kútmunkáknál ugyanezen iszapsűrűség mellett a kúton kiépítéskor túlfolyást észleltek, ezért az iszapsűrűséget 2,121 kg/dm³-re emelték. A konglomerátum szakaszban 4–7%, a homokkőrétegekben 8–10% porozitás volt jellemző. A kőzet repedezettsége a tárolókapacitást, különösen az áteresztőképességet (permeabilitást) jelentősen növelheti. A középső triász breccsásodott dolomit a legkedvezőbb tároló tulajdonságú preneogén kőzet a fúrásban. A tárolótulajdonságok a

mélységgel alig romlanak. A részletes rétegvizsgálat során a 3038–3492 m szakaszon perforált béléscső mögötti rétegek hosszan tartó vizsgálatokor termeltetés közben 3006 m-ben maximálisan 185,47 °C hőmérsékletet mértek. A termeltetés közbeni hőmérséklet-gradiens-mérés alapján a beáramlás 3165 méterből jött. A geotermikus gradiens erre a mélységre 55,4 °C/km. A termeltetés után lezárt kútban 25,5 óra alatt a hőmérséklet 184,84 °C-ra csökkent. A rétegvizsgálatok során a vízzel és gőzzel együtt termelt földgáz minősége változó volt. Az éghető rész 45,85–62,58% között, a fűtőérték 17,21–23,2 MJ között ingadozott. A víz összetétele is változó volt, azonban általánosan elmondható, hogy nagy sókoncentrációjú, változó keménységgel bíró lágú, NaCl-os ásványvíz, amelynek litium, fluorid- és meta-kovasav-tartalma is jelentékeny. Az utólagos vizsgálata során a fűrészáras rétegvizsgálatot 1991. május 16–21. között, a kapacitásvizsgálatot 1991. május 14–21. között végezték. A fűrészáras rétegvizsgálatot a talpig tisztított kútban 3000 méterben ültetett tömítővel végezték el. A fűrészáras vizsgálat során 3 termeltetési mennyiséget és 3 nyomásemelkedést mértek. A vizsgálati fűrészcső és a súlyosbítórakat egy része a fűrésberendezés csigasorán felfüggesztett állapotban volt. A horogterhelést azonos értéken tartva a rendszer 2,95 métert mozdult el felfelé (a flexibilis termeltető rendszer az elmozdulást követte). A kapacitásmérés során a kút kezelhetősége és a vízkőkiválás elkerülése érdekében kettős szűkítést alkalmaztak (a kút 3470 méterig kitisztított volt). A vizsgálat hőtechnikai elemzése alapján a fluidum valószínűleg 3165 méternél (T1 Jakabhegyi Homokkő Formáció) áramlott a kútba. A nyomásemelkedési görbe alakja inhomogén tárolóra utal. A közvetlen kútkörnyezeten (400 m-en) túl az áteresztőképesség várhatóan jobb, mint a közvetlen környezetben. En-



6. ábra. A Nagyszénás-3. kút kútfejszerelvénye a karácsonyfával



7. ábra. A víz állapotábrája

nek utánpótlódása viszont kisebb áteresztőképességű tárolórészből valószínűsíthető. A rétegvizsgálat során a maximálisan 1891,2 m³/nap víz és vele együtt kitermelt 10060 m³/nap gáz 4,5 bar nyomáson és 171 °C hőmérsékleten hagyta el a lefűtató vezetékét. Megfelelő kútszerkezetet és kútfej kialakítást feltételezve akár 3000 m³/nap víz + 15600 m³/nap gázmennyiséget is kitermelhetőnek tartanak. A termelhető gázmennyiségek mellett a kútnál megállapított 5,2 m³/m³ gáz/víz viszonytal és gázösszetétellel lehet számolni. A műveletek elvégzése után 1991 júliusában a kútban 2988 méterben helyezték el a záró cementdugót, a termelőcsövet kiépítették, és karácsonyfát szereltek fel (6. ábra).

Megállapítható, hogy a nagyszénási túlnyomásos hévíztárolóból a vízzel együtt oldott állapotú földgáz is termelhető. A szilícium-geotermométeres vizsgálatok alapján, a kúttalpon 193–199 °C hőmérsékletet tételeznek fel, a mérések során 4–8 km-es mélységből feláramló víz jelenlétét mutatták ki. A kútban megjelent nagy nyomású forró víz-gőz-gáz elegyet a Nagyszénás–Orosháza térségében várható a legalább 10 km-re lenyúló Ny-ÉNy–K-DK-i csapás tektonikai övhöz köthető a forróvíztárolóból származtatják.³

³ Egy magát feltalálónak nevezett vállalkozó 1992-ben 5 milliárd forint névértékű kárpótlási jeggyel akart megvalósítani egy, a kútra telepítendő 5000 kW-os villamos

Kérdések és válaszok

A geotermikus koncesszió megvalósításának előkészítése során számtalan kérdés merült fel, amelyek közül hat megválaszolását az alábbiak ismertetik.

Első kérdés: Mi lépett be a rétegből a 4239 m talpmélységnél történt fúrólyukegyensúly-megbomláskor?

A fúrólyukegyensúly-megbomláskor három fajta rétegtartalom áramolhatott be:

- ☐ szuperkritikus víz;
- ☐ nedves gőz;
- ☐ folyékony halmazállapotú víz.

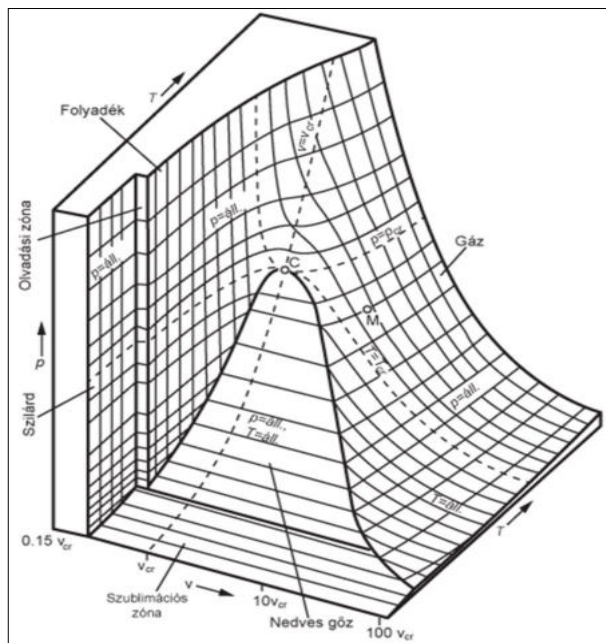
Szuperkritikus víz. A víz 373,946 °C hőmérséklet és 220,64 bar nyomás fölött „szuperkritikussá” válik.

erőművet. Emberek százaitól felvásárolta a kárpótlási jegyeiket, amit aztán elfelejtett kifizetni. A fejenként 200 000 forintról egészen egymillió összegű kárpótlási jegyeiket így módon elveszített emberek bírósághoz fordultak, s az hiába ismerte el igazukat, a vállalkozó nem fizetett. Tervéből bukás lett, börtönbe került, kettő és fél évre elítélték, amiből leült másfelet. Kiszabadulása után még próbálkozott perekkel, eredménytelenül. A kút azóta is zárva van, várja a felhasználását.

Efölött a kritikus pont fölött nem nevezhető sem szilárdnak, sem folyadéknak, de gázállapotúnak sem, leginkább „folyadékszerű gáz”-ként írható le (7. ábra).

Ha a szupercritikus víz szerves anyaggal érintkezik, felszakítja annak kémiai kötéseit, majd oxigén hatására reakció megy végbe (pirolízis). A 3744 m mélységben elvégzett fűrészáras rétegvizsgálat (DST) során 3684,5 m-ben 712,26 bar nyomást, 190,5 °C hőmérsékletet mértek. A beáramlás helyeként feltételezett 3881 m átlagmélységű rétegben az extrapolált hőmérséklet 199,6 °C és a rétegnomás 731 bar. A 4239 méteres talpra 219 °C hőmérséklet és 768 bar nyomás valószínűsíthető. A fenti értékekből látható, hogy a rétegfájdum nyomása ugyan túlhaladja a szupercritikus víz állapotához szükséges értéket, azonban a hőmérséklete nem. Így kijelenthető, hogy a 4239 m talpmélységnél történt fűrészyuk egyensúly-megbomlásakor nem szupercritikus víz lépett be a fűrészyukba.

Nedves gőz. A nedves gőz egy kétfázisú vízgőzkeverék, amikor egy adott állapotban egyidejűleg van jelen a cseppfolyós és a gőzállapot. Az állapotegyenlet általában nem adható meg egyszerű, analitikus összefüggéssel. Táblázatosan vagy más állapotjelzők függvényében grafikusan adható meg. Nyilvánvaló, hogy egy olyan egyenlet, mint a $p = p(V, T)$ egy felületen ábrázolható a p - V - T koordináta-rendszerben. Ez az ún. állapotfelület szakaszosan folytonos felületdarabokból áll, ahogy az a 8. ábrán látható.

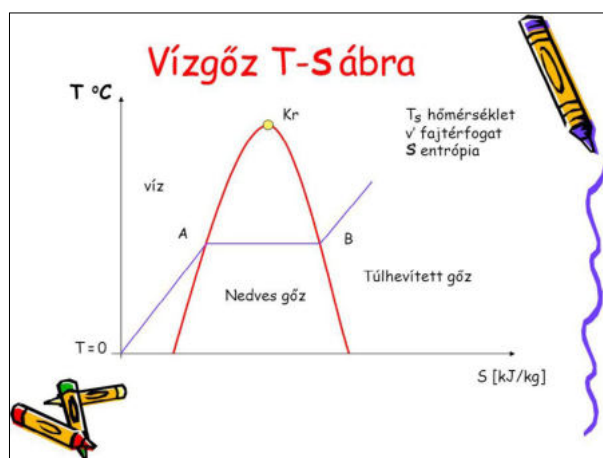


8. ábra. A víz teljes állapotfelülete

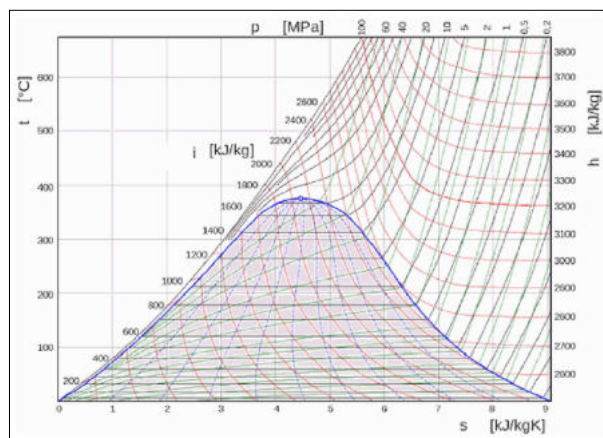
Szokás ennek a felületnek a vetületeit venni a p - V , a p - T és a V - T koordináta-síkokon. Egy ilyen vetületen a harmadik állapotjelzőt paraméterként

használják. Az állapotfelület konkrét alakja mindig jellemző egy adott anyagra. Más termikus állapotjelzők, mint az entalpia vagy az entrópia egyértékű függvényei a telítési hőmérsékletnek vagy a nyomásnak a telítési határgörbék mentén. Az alsó határgörbén a víz telített állapotban van, a felső határgörbén a telített gőzállapot található.

T (hőmérséklet) – S (entrópia) diagram. Az összefüggések grafikus megjelenítésére szolgál a T - S diagram, amely a jelenségek megértését nagymértékben megkönnyíti. A 9., 10. ábrán látható a vízgőz T - S diagramja.



9. ábra. A vízgőz T - S diagramja



10. ábra. A vízgőz T - S diagramja

Az entrópiát az abszcisszán, a hőmérsékletet az ordinátán ábrázoltuk. A diagram középpontjában egy jellegzetes harang alakú tartományt látunk, amelyet alsó és felső határgörbék fognak közre balról, illetve jobbról. A görbe tetőpontjában helyezkedik el a kritikus pont, amelynek paraméterei $p_c = 217,7$ bar, $T_c = 374$ °C és $v_c = 0,00318$ m³/kg. A kritikus pontban az entrópia $S_c = 4,4296$ KJ/kgK, az entalpia $I_c = 2099$ KJ/kg. Az alsó határgörbe választja el a vízfázist a víz-gőz keverék tartományától. A felső határgörbe a

kétfázisú tartományt választja el a száraz, túlhevített gőz területétől. A telítési határgörbéken bármelyik termodinamikai paraméter csupán egyetlen változótól függ: ez lehet a telítési hőmérséklet vagy a nyomás. Mind a víz állapotábráján és a teljes állapotfelületén, mind pedig a vízgőz T – S diagramján látható, hogy a beáramlás helyén vagy a fűrőlyuktalpon lévő nyomás- és hőmérsékleti körülmények között csak vízfázis van jelen. Így kijelenthető, hogy a 4239 m talpmélységnél történt fűrőlyukegyensúly-megbomlásakor nem nedves gőz lépett be a fűrőlyukba.

Folyékony halmazállapotú víz. A beáramlás helyeként feltételezett 3881 m átlagmélységű tárolótól a lyukfejig tartó úton a nyomás 731 bar-ról 360 bar-ra csökkent, a hőmérséklet pedig 199,6 °C értékről mintegy 191,5 °C-ra mérséklődött. Ezek az adatok teljesen egyértelművé teszik, hogy a víz – útjának teljes hosszában – csak folyékony halmazállapotú lehetett. A 191,5 °C hőmérsékleten a telített gőz nyomása 13,3 bar, így gőzfázis megjelenése a fűrőlyukban sehol sem volt lehetséges. Tehát a lyukfej kilépő keresztmetszetéig nagy nyomáson áramlott a víz, amely a kilépéstől kezdve individuális fázisátalakuláson (gőz) ment át. A mérések alapján várható 202 °C körüli hőmérsékletet jelentősen meghaladó, a SiO₂ geotermométer alapján becsült 254 °C hőmérséklet arra utal, hogy nagyobb, 5-6 km mélységből feláramló víz is jelen lehetett a fúrásban. Az L-Cl geotermométer 325 °C hőmérsékletadata is mélységi eredetű vizek (törések menti) feláramlását és az aljzatban tárolt vizekhez való hozzákeveredését valószínűsíti. A dehidratizációs (víztelenedési) elmélet szerint a Föld mélyében – a nagy nyomás és hőmérséklet következtében – a kőzetek eredeti víztartalmukat elvesztik, víztelenednek. Gautier kísérletileg kimutatta, hogy 1 kilogramm gránit vörös izzás mellett 2,5 gramm vizet ad le, azaz 1 km³ gránit 25–30 millió tonna vizet tud leadni. Weszelszky Gyula pedig azt mutatta ki, hogy a súlylyedő medencékben (pl. itt a Nagyalföldön) a geotermikus gradiens (földmelegedési fokozat) azért nagy, mert a medencealjzat kőzetei a magma közelébe jutva vizüket leadják, víztelenednek (dehidratizálódnak). Ez a víz gőz alakjában felfelé mozog, majd a viszonylag hidegebb rétegekben – adott nyomáson és hőmérsékleten – ismét folyékony halmazállapotú vízzé válik. A víztelenedő kőzetek így fel nem mérhető vízmennyiséget adhatnak át a felszínhez közelebb elhelyezkedő víztartó kőzeteknek. Ezáltal a felszín alatti víz is örökös körforgásban van, s ezt a vízféleséget profundus víznek nevezik.

A fentiek alapján, továbbá a víz állapotábráján és a teljes állapotfelületén, valamint a vízgőz T – S diagramján is látható, hogy a beáramlás helyén vagy a

fűrőlyuktalpon lévő nyomás- és hőmérsékleti körülmények között csak vízfázis van jelen. Így kijelenthető, hogy a 4239 m talpmélységnél történt fűrőlyukegyensúly-megbomlásakor folyékony halmazállapotú víz lépett be a fűrőlyukba. Ebből az is következik, hogy az itteni 200 °C körüli hőmérséklet és 700–800 bar körüli nyomás mellett a rétegekben a víz folyékony halmazállapotban van jelen.

A fűrőlyukban kialakult nyomás- és hőmérsékleti viszonyok mellett a víz sűrűsége 920 kg/m³, a kinematikai viszkozitási tényező $1,3 \cdot 10^{-7}$ m²/s. Bár a víz gyakorlatilag összenyomhatatlan, de a kompressziómodulusa jól számítható a hangsebességből: $K = \rho \cdot c^2$ vagy $K = \rho \cdot dP/d\rho$, ahol ρ a sűrűség, c a hangsebesség, $dP/d\rho$ a nyomás sűrűség szerinti deriváltja. Ez a víznél 22 000 bar körüli érték, azonban 200 °C körül 11 000–17 000 bar tartományig csökken, és a nyomástól is függ. Néhány érték a víz sűrűségére az érintett tartományban:

Hőmérséklet (°C)	Gőznyomás (bar)	Tényleges nyomás (bar)	Sűrűség (kg/m ³)
180	10	11	886
180	10	200	900
200	15,6	16	864
200	15,6	735	910
Megjegyzés: A 2% körüli sótartalom 6 kg/m ³ sűrűség-növekedésnek felel meg.			

Első válasz: A 4239 m talpmélységnél történt fűrőlyukegyensúly-megbomlásakor 920 kg/m³ sűrűségű folyékony halmazállapotú víz lépett be a fűrőlyukba.

Második kérdés: Milyen gáztartalma volt a víznek?

A dolomitban (dolomitbreccsában) mint kettős porózitású rendszerben szinte gázatlan víz van. Még annyi gáz sincs benne, amennyi az itt lévő nyomáson és hőmérsékleten oldatban lehetne, és ennek oka a nagymértékű túlnyomás. A gáztartalomról csak annyi információ van, hogy a kitörés folyamán három gáz jelenlétét és koncentrációját folyamatosan mérték: metánt (CH₄), szén-dioxidot (CO₂) és kén-hidrogént (H₂S). A metántartalom a kitörés megközelíthető területén megmérhetetlenül alacsony volt, jöllehet a levegőnél könnyebb gáz távozását a felszínre tört vízből könnyű magyarázni. Hasonlóképpen alacsony volt a szén-dioxid-koncentráció is, ez viszont csak 140 °C körül lesz könnyebb a 0 °C körüli levegőnél. A mért alacsony szén-dioxid-koncentrációt magyarázhatják a következő kérdésben leírtak is, azaz, hogy a mért CO₂ csak a vízben oldott kalcium-hidrogén-karbonát bomlásakor keletkezett. A kén-hidrogén enyhe szaga észlelhető volt, de messze határérték alattinak mérték. A

három gáz egyike sem igényelt a szokásostól eltérő óvintézkedést.

Második válasz: A 4239 m talpmélységnél történt fúrólúkegyensúly-megbomlásakor a fúrólukba belépett 920 kg/m³ sűrűségű folyékony halmazállapotú víz szinte semmi szén-dioxidot, továbbá alig valamennyi metánt és kén-hidrogént tartalmazott.

Harmadik kérdés: Milyen volt a vízkőképződés?

A vízkőkiválás a vízben oldott sók kiválása a vízkutak felső szakaszán és a kútfejen – a buborékpont felett – a víz szabad szén-dioxid (CO₂) és a kalcium-hidrogén-karbonát- (Ca(HCO₃)₂) tartalma közti egyensúly felbomlása során történik. A rétegvizekben szoros összefüggés áll fenn a víz szabad szén-dioxid- és kalcium-karbonát-tartalma között. A vízben oldott kalcium-hidrogén-karbonát a



egyenletnek megfelelően bomlik a vízben gyakorlatilag oldhatatlan kalcium-karbonátra, vízre és szén-dioxidra. Ez az egyenlet megfordítható. Tehát, ha a vízben oldott szén-dioxidot valamilyen módon eltávolítjuk, akkor a reakció a felső nyíl irányában zajlik le, s a vízből oldhatatlan kalcium-karbonát válik ki. Ha viszont szén-dioxidot vezetünk a vízbe, a reakció megfordul, és a kivált kalcium-karbonát feloldódik, hidrokarbonáttá alakulva. Azt a szabad szén-dioxidot, amely a feloldódott a (HCO₃)₂ oldatban tartáshoz szükséges, egyensúlyi szén-dioxidnak nevezik. Ha a víz éppen az egyensúlyi szén-dioxidnak megfelelő szabad CO₂-t tartalmazza, akkor karbonát-szén-dioxid egyensúly áll fenn. Az egyensúlyi szén-dioxid-mennyiség a víz hőmérsékletétől és a Ca(HCO₃)₂-tartalmától függ. A szabad, illetve az egyensúlyi CO₂-, valamint a Ca(HCO₃)₂-tartalmától függően a vizekben három eset különböztethető meg:

- Ha a víz szabad szén-dioxid-tartalma kevesebb, mint amennyi a karbonát-szén-dioxid egyensúlyhoz szükséges, a vízből kalcium-karbonát válik ki mindaddig, amíg a kalcium-hidrogén-karbonát-koncentráció az egyensúlyi értékre nem csökken. A béléscső belső falán így vízkőképződés alakul ki, csökkentve a belső átmérőt, és növelve az áramlási nyomásvesztést. Ez történt a kitérés alkalmával a csökkent szén-dioxid-tartalmú lehűlő vízzel.
- Ha a víz szabad szén-dioxid-tartalma a kalcium-hidrogén-karbonát koncentrációjának megfelelő egyensúlyi értékkel egyenlő, az áramló vízből nem válik ki vízkő.
- Ha a víz szabad szén-dioxid-tartalma nagyobb az egyensúlyi értéknél, akkor az esetleg már lerakódott kalcium-karbonát-réteget leoldja a

béléscső faláról, az acéllal szemben pedig agresszíven viselkedik.

A szilíciumdioxid (SiO₂) kiválása is hozzájárulhatott a vízkövesedéshez.

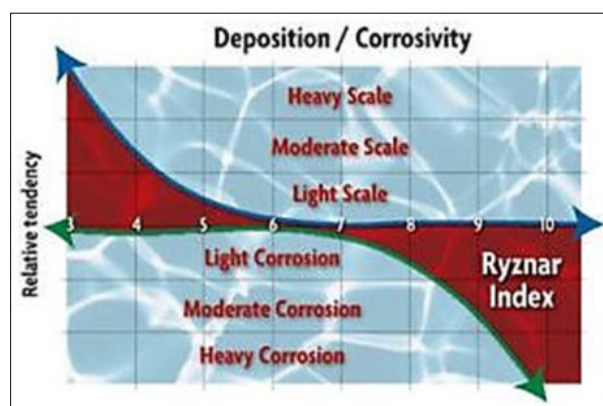
Az egyensúlymegbomlási folyamatot a víz pH-értéke is befolyásolja. A víz vízkőkiválási és korrodálási hajlamának értékelésére alkalmazzák a Ryznar-indexet, más néven Ryznar-féle *stabilitási indexet* (RSI), amelyet a víz aktuális pH-ja, hőmérséklete, só- és ion-tartalma alapján lehet meghatározni:

$$\text{RSI} = 2 \times \text{pH}_s - \text{pH},$$

ahol pH_s a szaturációs (telítettségi) pH

Abban az esetben, ha a Ryznar-index értéke:

- RSI < 5 intenzív vízkőkiválás várható;
- 5 < RSI < 6 vízkőkiválás várható;
- 6 < RSI < 7 átmeneti tartomány van;
- 7 < RSI < 7,5 korrozó a jellemző;
- 7,5 < RSI < 9 korrozó várható;
- 9 < RSI intenzív korrozó várható (11. ábra).



11. ábra. A Ryznar-index

A Ryznar-index kalkulátorral elvégzett számítás alapján a felszínre kitörő víz RSI-értéke 3,72-re adódott.

A kitérés közben 100%-ban megbízható vízmin-tavétel nem volt lehetséges, mert csak az árokban elfolyt és a felszíni vízzel keveredett víz volt hozzáférhető. Ezt a vizet később egy földbe vájt tartalékgödörbe vezették. A vízben oldott sókról – hasonlóan a gáztartalomhoz – így kevés megbízható információ adódott. A vett vízmintákban a vízkövesedést okozó sók már nem nagyon voltak, ezek a hűlés során kiváltak. A sóösszetételben felsorolt sókból csak a Ca(HCO₃)₂ tudott kicsapódni. A többi só oldhatósága magasan az adott koncentráció fölött volt, a NaCl oldhatóságát még a hőmérséklet is alig befolyásolja. A könnyebb sók – elsősorban a nátrium – messze az oldhatósági határ alatt voltak. A konyhasó oldhatósága 20% körüli, a beáramlott rétegvíz sótartalma 2% kö-

rüli volt (kisebb, mint a leghígabb tengervíz). A szulfáttartalom kizárja az alkáli földfémeket, a magnéziumot kivéve, azonban korlátozott kalciumtartalom megengedett. Tehát sem barit, sem pedig rádiumsók nem lehettek jelen. A kismértékben kimutatott barit a nehezített öblítőiszapból szennyezésként kerülhetett be, de földtanilag is nehezen képzelhető el ebben a mélységben barittartalmú réteg. A kivált vízkő tömör, szinte kvarc állagú, sósavban a porozitás híján lassan, de maradék nélkül oldódott, s ez kizárja a kavasavtartalmat. Hófehér színű volt, ez viszont arra utalt, hogy vas vagy egyéb nehézfém kizárható volt. Az, hogy a víz szinte semmi szén-dioxidot nem tartalmazott és a $8\frac{5}{8}$ "-es bélésű csőben 1167,5 m-ben megindult a vízkőkiválás, továbbá a kalkulált Ryznar-index értéke, a vízkő tömörsége és keménysége is arra utalt, hogy itt az egyensúlyfelbomlással volt kapcsolatos a vízkőképződés. A $8\frac{5}{8}$ "-es bélésű csőben kivált vízkövet 21 napig fűrtak ki, és a vízkő vegyi összetételéről nincs adat. A rétegfűrés teljes oldott szilárdanyag- (só-) tartalma 27,21 g/l volt.

Harmadik válasz: A vízkőképződés elsősorban a víz szabad szén-dioxid- (CO_2 -) és a kalcium-hidrogén-karbonát- ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ -) tartalma közti egyensúly felbomlása során a nagy vízkövesedést okozó kalcium-hidrogén-karbonát és a többi kismértékű vízkövesedést okozó sók kicsapódásával volt kapcsolatos.

Negyedik kérdés: Mi tudható a belépett víz radioaktivitásáról?

A radioaktivitásra vonatkozó információk eredetét és tartalmát ellenőrizni kell, ugyanis a fűrészekben számos radioaktív mérés történt – elsősorban rétegtani céllal (természetesgamma, gamma–gamma, neutron–gamma stb.), s ezek semmiféle rendkívüli eredményt nem mutattak ki. A fűrészerendezésnél izotóppal dolgozó szakemberek (geofizikusok, geológusok, iszapvegyészek, csővizsgálók) a zsebükben hordott doziméterrel közlekedtek, ennek eredményéről sincs semmi rendkívüli. Ha lett volna – bármilyen okból is –, akkor riasztottak volna. Továbbá a vízelemzésből is hiányzik a káliumtartalom, pedig ez az az elem, amelyik a háttérsugárzás fő forrása, annak 86%-át adja. A kálium ^{40}K izotópja is radioaktív. A kőzetek káliumtartalmának 0,0118%-a radioaktív izotóp, felezési ideje 1,277 milliárd év. Ez 88%-ban β - és 1,36 MeV γ -sugárzással ^{40}Ca izotóppá alakul, a bomlás 12%-ban elektronbefogással (pozitronkibocsátással) metastabil ^{40}A atom és 1,46 MeV γ -sugárzással stabil ^{40}A atom keletkezik. Az argon a továbbiakban már nehezen válik el a földgáztól, és jelzi azt az időt, amelyet a földgáz a migráció során a csapdában töltött. A kalciumot viszont már soha nem lehet elkülöníteni az eleve kő-

zetalkotó kalciumtól, tehát semmiféle információs értéke nincs.

Negyedik válasz: A belépett víz radioaktivitásáról meglévő információk és adatok bizonytalanok, azokat ellenőrizni kell.

Ötödik kérdés: A lyukmegölés folyamán milyen mélységben történt a rétegfűrés visszanyomása a rétegbe?

A $8\frac{1}{2}$ "-es szelvényben előfűrés közben $1,65\text{ kg/dm}^3$ sűrűségű öblítőiszap alkalmazásával 3733 m talpmélységnél a fűrés egyensúlya megbomlott, az egyensúly helyreállítását fűrés módszerrel $2,10\text{ kg/dm}^3$ sűrűségű öblítőiszappal végezték el. Ezzel az öblítőiszap sűrűséggel 3740 m-ig magot fűrtak folyadékvesztés nélkül. Ez azt jelentette, hogy a 2750–3740 m közötti nyitott szakasz elbírta a $2,10\text{ kg/dm}^3$ sűrűségű öblítőiszapból adódó nyomást. A nyitott fűrés szakaszt felbővítették $10\frac{5}{8}$ "-re, majd a $8\frac{5}{8}$ "-es bélésű csövet 3698 m-ig beépítették, és 1970 m-ig elcementezték a fűrés teljes egyensúlya mellett. 3744 m-ig előfűrtak, ahol rétegtérhelési próbát (FIT = *Formation Integrity Test*) tartottak $2,10\text{ kg/dm}^3$ sűrűségű öblítőiszappal és 35 bar nyomással, ami eredményes volt. Ez azt jelentette, hogy a 3698–3744 m közötti nyitott felső kréta rétegsor elbírta a $2,10\text{ kg/dm}^3$ sűrűségű öblítőiszap nyomását folyadék kiszivárgás vagy felrepedés nélkül. Ebben a mélységben elvégzett fűrészáras rétegvizsgálat (DST = *Drill Stem Test*) eredménye: $P_{ws} = 712,3$ bar, ez azt mutatta, hogy a rétegnyomás ~ 74 bar-ral volt túlegyensúlyozva.

3795 m-es talpmélységnél kiépítés közben a fűrés egyensúlya ismételtén megbomlott, túlfolyás jelentkezett olyan helyzetben, hogy a fűrészárszám vége 564 m-ben volt. Ezért a fűrés egyensúlyát csak lyukmegöléssel lehetett helyreállítani, amit $2,12\text{ kg/dm}^3$ sűrűségű öblítőiszappal sikeresen végrehajtottak. A további előfűrés alatt 4239 m-ig az öblítőiszap sűrűségét $2,12$ – $2,14\text{ kg/dm}^3$ értéken tartották, további sűrűség-növelés ($2,15\text{ kg/dm}^3$) a részleges iszapvesztés miatt nem volt lehetséges. Ez azt jelentette, hogy a 3698–4239 m közötti nyitott felső kréta, középső triász és alsó triász rétegsorok elbírták a $2,14\text{ kg/dm}^3$ sűrűségű öblítőiszap nyomását folyadék kiszivárgás vagy felrepedés nélkül.

4239 m-es talpmélységnél a fűrészárszám kiépítése közben a fűrés egyensúlya harmadszor is megbomlott, amely kitöréshez vezetett. A kitörés áramlás- és hőtechnikai folyamatainak rekonstrukciója során a kitörés helyeként feltételezett 3881 m átlagmélységű rétegben az érintetlen rétegnyomás 731 bar volt. Ebben a mélységben az $2,12\text{ kg/dm}^3$ sűrűségű öblítőiszap statikus nyomása 822,8 bar nyo-

más volt, amely az jelenti, hogy a rétegnyomás ~92 bar-ral volt túlegyensúlyozva. A 4239 m-es talpra extrapolált nyomás 768 bar. Ebben a mélységben az 2,12 kg/dm³ sűrűségű öblítőiszap statikus nyomása 898,7 bar nyomás volt, ami az jelenti, hogy a rétegnyomás ~131 bar-ral volt túlegyensúlyozva. Ez azt mutatja, hogy a fűrőlyuk egyensúlyának megbomlását nem a váratlanul megemelkedett rétegnyomás, hanem a fűrőszerszám kiépítése közbeni lyukeltöltés elmulasztása vagy a gyors kiépítés miatt fellépő fűrőlyuk megdugattyúzása, illetve mindkettő egyszerre történő hatása okozta. A fűrőlyuk egyensúlyát végül lyukmegöléssel lehetett helyreállítani, amelyet 2,15 kg/dm³ sűrűségű öblítőiszappal sikeresen végrehajtottak. A kitörés folyamán a fűrőlyukban 0,92 kg/dm³ sűrűségű folyékony halmazállapotú víz volt, amelyet a lyukmegölés folyamán vissza kellett nyomni a rétegbe. A fűrőlyuk teljes ürtartalmának megfelelően 130 m³ 2,15 kg/dm³ sűrűségű iszapot nyomtak a fűrőlyukba. A lyukmegölés 420 bar nyomással indult, amely fokozatosan csökkent a művelet végéig. Majd 18 nap után a fűrőlyuk és a lyukfejszerelvény rendbetételére egy kisebb kapacitású fűrőberendezést szereltek fel. A 8^{5/8}”-es béléscsővön 35 bar nyomást találtak, ami azt jelentette, hogy a fűrőlyukban a lyukaltól felfelé 380 m magasságban (3879 m-ig) 0,92 kg/dm³ sűrűségű folyékony halmazállapotú víz volt, a felett pedig 2,15 kg/dm³ sűrűségű iszap. A sikertelen nyomásleeresztés után a fűrőlyukat ismét megölték 60 m³ 2,15 kg/dm³ sűrűségű iszappal. Ezek után tudták folytatni a munkálatokat.

Ötödik válasz: A lyukmegölés folyamán 3750 m és 3879 m közötti középső triász repedezett dolomit (dolomitbreccsa-) rétegbe történt a rétegfluidum viszszanyomása.

Hatodik kérdés: Hová sajtolható vissza a kitermelt rétegvíz felhasználás után?

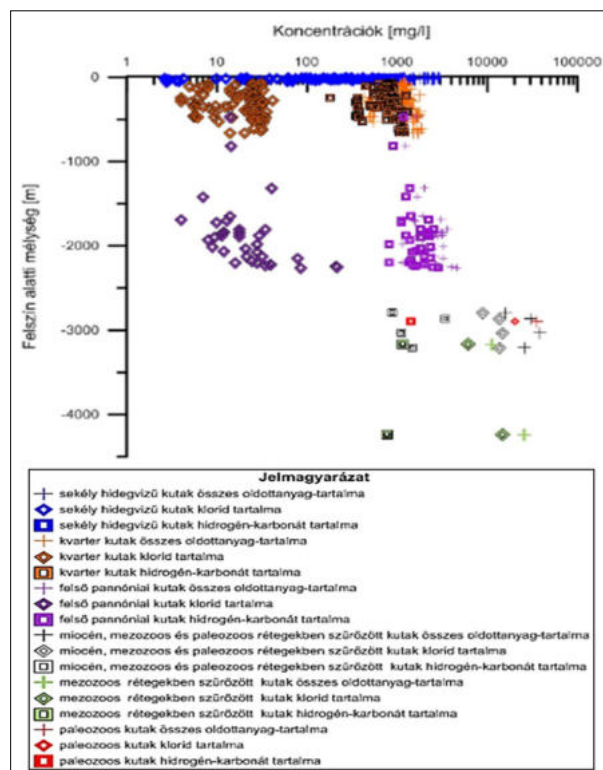
A visszasajtolásra kerülő víz minősége lehetőleg közel azonos legyen a befogadó rétegekben (tároló képződményekben) lévő víz minőségével. Kiemelt megkötés, hogy lebegőanyag- (szárazanyag-) tartalma nem haladhatja meg az 1 mg/l-t, továbbá bakteriológiai és biológiai szennyeződések nem tartalmazhat. A visszasajtolásnál azt is figyelembe kell venni, hogy a felhasznált vízből már eltávozott a gáztartalom, kicsapódott néhány oldott anyag, így a visszanyomott víz már összetétel szempontjából sem rendelkezik azonos paraméterekkel. Fontos kiemelni, hogy hévíz visszatáplálás – a hatóságok által jóváhagyott – a kitermeléssel azonos vagy azonos célra használt felszín alatti térrészbe csak azoknál a bizonyítottan nem szennyeződött, zárt rendszerű, energetikai célú hé-

vízhasznosításoknál jöhet szóba, ahol kizárható a felszín alatti vizek elszennyezése.

Tehát:

- ❑ A geotermikus energia hasznosítására kitermelt vizet zárt rendszerben kell felhasználni és visszacsajtolni.
- ❑ A kitermeléssel azonos vagy azonos célra használt rétegbe történő vízvisszasajtolás előírása kizárja a pannon rétegekbe történő vízvisszasajtolást.
- ❑ Az, hogy a visszasajtolásra kerülő víz minősége lehetőleg közel azonos legyen a befogadó rétegekben lévő víz minőségével, szintén kizárja a pannon rétegekbe történő vízvisszasajtolást, ugyanis
 - a területen a felső pannóniai vizek összes oldottanyag-tartalma (TDS) 1,9–3,0 g/l,
 - a területen az alsó pannóniai vizek összes oldottanyag-tartalma (TDS) ~5 g/l,
 - a rétegfluidum összes oldottanyag-tartalma (TDS) a Fáb–4. fúrásban 27,21 g/l, a Nsz–3. fúrásban 24,45–25,40 g/l volt.

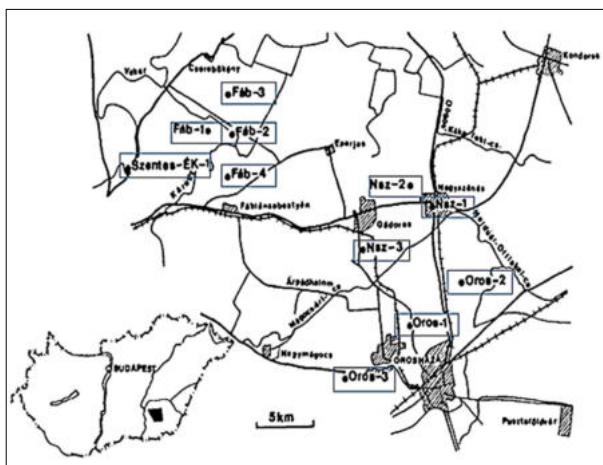
A vízvisszasajtolás csak az alsó pannóniai képződményeknél idősebb rétegekbe történhet, ahol 15,0–30,0 g/l az összes oldottanyag-tartalma (TDS) a rétegvizeknek. A koncessziós terület felszín alatti vizei főbb vízminőségi paramétereinek mélység szerinti alakulását a 12. ábra mutatja be.



12. ábra. A főbb vízminőségű paraméterek alakulása a mélység függvényében a koncessziós terület felszín alatti vizeiben

A mélység növekedésével nő a víz összes oldott-anyag-tartalma a felszíntől számított körülbelül 3000 méteres mélységig, mely alatt számottevő változást e komponens nem mutat. Éles vízminőségi változás tapasztalható körülbelül 2500 méter felszín alatti mélységben, ahol a víz kémiai jellege NaHCO_3 -os jellegről NaCl -os jellegre vált.

Gádosoros geotermikus koncesszió körzetében lévő kutak. A Gádosoros geotermikus koncesszió körzetében – kb. 15 km sugarú körön belül – 11 olyan szénhidrogén-kutató fúrás (kút) található, amelyet érdemes víz-visszasajtolásra megvizsgálni. Ebből 10 a koncesszió területén van és egy azon kívül (Oros-3.) (13. ábra).



13. ábra. A Gádosoros geotermikus koncesszió körzetében lévő kutak

A 10 db szénhidrogén-kutatófúrásból 6 db pretercier aljzatot elért fúrás esik a területre. A terület 2000 m-nél mélyebb fúrásokkal való feltártsága közepes: a Fáb-1., Fáb-2., Fáb-3., Fáb-4., Nsz-1., Nsz-2., Nsz-3., Oros-1., Oros-2. és Szent-ÉK-1. fúrások esnek a területre (1., 2. táblázat).

A Gádosoros geotermikus koncesszió körzetében lévő 11 kútba történő vízvisszasajtolás lehetőségének vizsgálata az alábbi szempontok alapján történt:

- ❑ Van-e a kútban pannonnál idősebb korú, víz-visszasajtolásra alkalmas réteg.
- ❑ A jelenlegi kútállapot alkalmas vagy alkalmassá tehető-e vízvisszasajtolásra.
- ❑ A kút területi elhelyezkedése a koncesszió körzetében.

Nagyszénás-1. (Nsz-1.) kút. Az 1950-es évek elején elindított nagyalföldi mélyfúrési program célja az volt, hogy a Nagyalföld mélymedencéjének üledékeiben szénhidrogén keletkezésére és felhalmozódására milyen körülmények alakultak vagy alakulhattak ki. A Nagyszénás-1. (Nsz-1.) jelű földtani alapfúrást a Magyar-Szovjet Olaj Rt. (MASZOLAJ) Kőolajkutató és Feltáró Vállalata mélyítette le 3009 méter talpmélységig 1953–1954-ben. A paleozoós alaphegységet nem érték el, alsó pannóniai rétegsorban álltak meg. Az 1888–1895 méterben megnyitott alsó pannóniai homokkőösszetből 460 m³/nap (320 liter/perc) 75 °C hőmérsékletű hévizet kaptak. A vízkúttá történt kiépítése után a kút a Nagyszénás város tulajdonába került, és fürdőt létesítettek. A fürdő 1999-ig működött.

1. táblázat. Szénhidrogén-kutatófúrások a koncessziós területen

Település	MBFH azonosító	EOV Y (m)	EOV X (m)	Z (mBF)	Mélység (m)	Dátum	MBFH dokumentáció
Fábiánsebestyén	Fáb-1	755 820,41	154 260,04	82,52	3342	1965	1222/2mf
Fábiánsebestyén	Fáb-2	757 920,83	154 036,12	81,86	3259	1966	1222/3mf
Fábiánsebestyén	Fáb-3	757 563,07	156 843,81	82,24	3600	1968	1222/4mf
Fábiánsebestyén	Fáb-4	757 481,76	151 048,69	82,5	4239	1986	T.16710, T.14163
Nagyszénás	Nsz-1	774 149,62	148 630,04	87,95	3009	1954	676/3mf
Nagyszénás	Nsz-2	772 334,75	150 148,45	86,93	3159	1982	676/4mf
Nagyszénás	Nsz-3	768 356,6	145 695,62	85,68	3500	1981	676/5mf
Orosháza	Oros-1	772 231,96	140 435,24	88,17	2804	1979	715/19mf
Orosháza	Oros-2	776 524,29	143 411,97	88,16	2877	1980	715/20mf
Szentes	Szentes-ÉK-1	749 166,06	151 854,1	84,47	3400	1987	

2. táblázat. Pretercier aljzatú fúrások a koncessziós területen

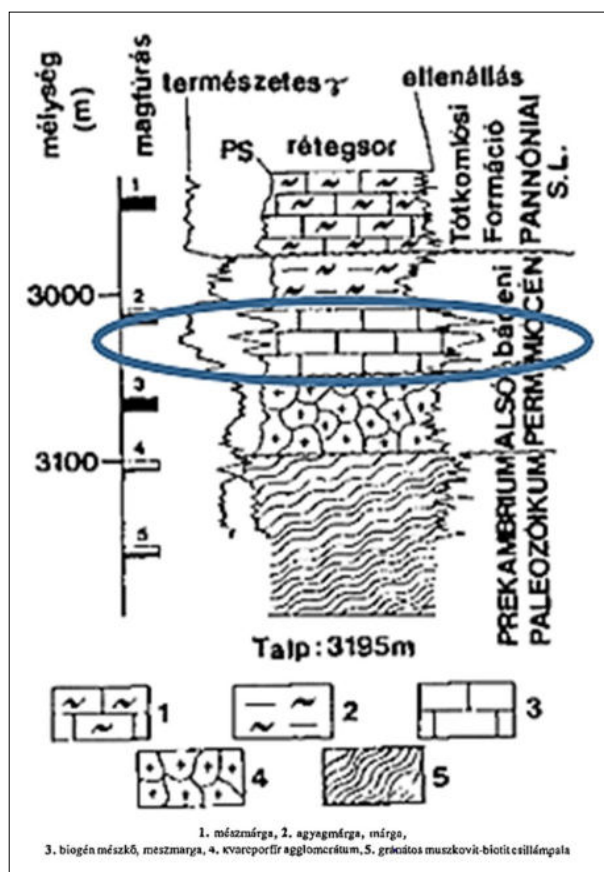
Frs_id	Település	Fúrás	EOV Y (m)	EOV X (m)	Z (m)	Mélység (m)	Dátum	Pretercier*
49661	Fábiánsebestyén	Fáb-4	757 481,67	151 049	83,18	4239	1986	3153 m csK3
100377	Nagyszénás	Nsz-2	772 334,62	150 148,5	87,61	3159	1982	3059 m gP1
100378	Nagyszénás	Nsz-3	768 356,43	145 695,8	86,36	3500	1981	3037 m jT1
110564	Orosháza	Oros-1	772 231,71	140 435,3	88,85	2804	1979	2616 m B_Pz
110565	Orosháza	Oros-2	776 524,07	143 412	88,84	2877	1980	2870 m sgT2
164138	Szentes	Szent.ÉK-1	749 166,01	151 854,5	85,15	3400	1987	3205 m ?K3

*Első pretercier réteg felszíne (m) és képződménye: K3 – felső kréta, csK3 – Csikériai Márga F., sgT2 – Szegedi Dolomit F., jT1 – Jakabhegyi Homokkő F., gP1 – Gyűrűfői Riolit F., B_Pz – Battonyai Komplexum

dött, majd közel 20 évi szünet után a kutat és a fürdőt felújították. A termálvíz hőenergiáját a közintézmények (iskola, óvoda, orvosi rendelő, művelődési ház, polgármesteri hivatal és a megyei fenntartású szociális otthon) fűtésére használják fel. Ismét megnyílt a Parkfürdő, ahol gyógyászati célokra is használják a jótékony hatású termálvizet. A 40–60 °C-os hulladékhőt pedig mintegy 21 ezer m²-es fóliasátor és üvegház fűtésére használják.

Megállapítás: A Nagyszénás-1. (Nsz-1.) kút víz-visszasajtolásra nem alkalmas.

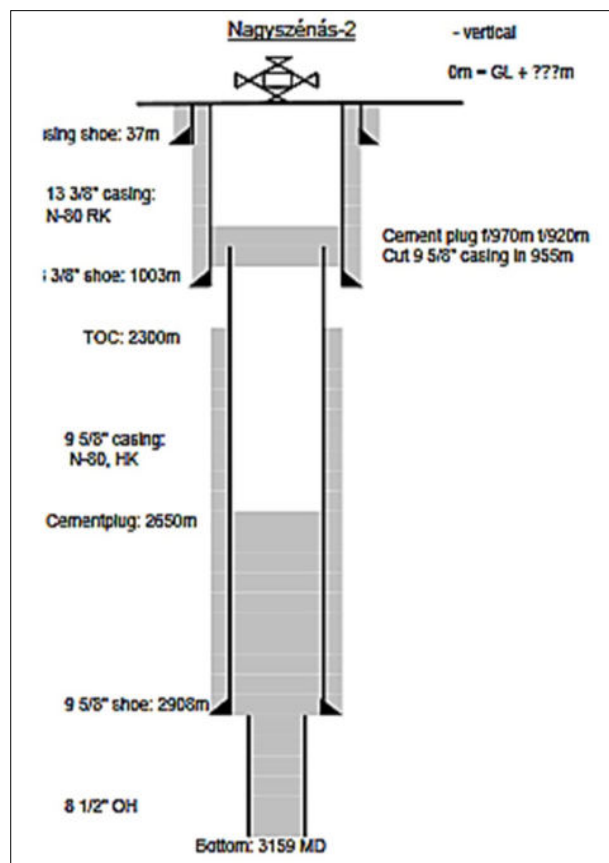
Nagyszénás-2. (Nsz-2.) kút. A Nsz-2. fúrást 1982-ben mélyítették le 3159 m talpmélységig, és vizsgálták ki. A fúrást szénhidrogénre meddővé nyilvánították (14. ábra).



14. ábra. A Nsz-2. fúrás alsó részén feltárt földtani képződmények

A kút végleges állapota:

- ❑ védő cementdugók a 9 5/8" beléscsőben 2905–2725 m és 2716–2650 m,
- ❑ 9 5/8" beléscső kimentve 955 m-ig,
- ❑ záró cementdugó a 9 5/8" × 13 3/8" beléscsövekben 970–920 m,
- ❑ a kútban 2,05 kg/l sűrűségű iszap van,
- ❑ a kúton 350 bar nyomáshatárú beléscsőfej és karácsonyfa van (15. ábra).



15. ábra. A Nsz-2. kút végleges állapota

Általános vélemény:

- ❑ A miocénben 3015–3059 m között lévő barnásszürke biogén mészkő első gondolatra talán alkalmas is lehetne a vízvisszasajtolásra.
- ❑ Azonban, a 2/2. mag (3015–3018 m) leírása alapján a biogén mészkő barnásszürke, helyenként meszesedett növényi töredékek feldúsulásától sárgásbarna, tömött, kemény és rétegtelen.
- ❑ Továbbá, a biogén mészkőben a 3159 m talpmélységig alkalmazott 2,05 kg/l sűrűségű öblítőiszappal még részleges iszapvesztés sem lépett fel.
- ❑ Ez utóbbi kettő azt mutatja, hogy a biogén mészkő tömött, nem repedezett és vízvisszasajtolására alkalmatlan.
- ❑ Műszaki szempontból is nagyon költséges lenne a kút kiképzése, mivel a szükséges munkálatok:
 - Cementdugók kifúrása és nyitott szakasz kitakarítása 3060 m-ig
 - 7" beléscső beépítése 3059 m-ig (3015–3059 m között előreperforált- vagy réselet)
 - 7" beléscső cementezése 3015–2800 m között
 - Biogén mészkő savas rétegrepesztése
 - Azonban, ezek a munkálatok sem garantál-

ják, hogy a biogén mészkő alkalmassá tehető a vízvisszasajtolásra.

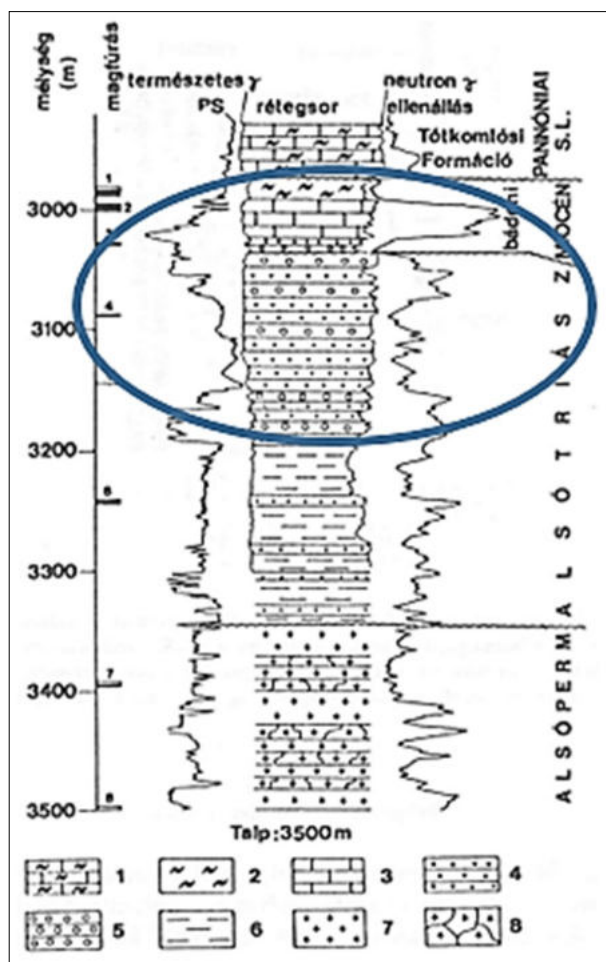
Megállapítás: A Nagyszénás-2. (Nsz-2.) kút víz-visszasajtolásra nem alkalmas.

Nagyszénás-3. (Nsz-3.) kút. A Nsz-3. kút a koncesz-sziós területen aránylag központi helyen van, így bárhol is lesz a termelő kút, ehhez a kúthoz lehet legrövi-debb a visszasajtolandó vizet szállító vezeték.

A 3500 m talpmélységet elérő Nsz-3. fúrásban az alsó triász korú rétegek 3037–3410 m között találhatók. A vízvisszasajtolásra megfelelő réteg a Jakabhegyi Homokkő Formáció (3037–3240 m), amelyet a 4. mag (3088–3089 m, magnyereség 0,6 m) és az 5. mag (3144–3145 m, magnyereség 0,2 m) is bizonyított. 3240 m-től 3410 m-ig már vörösesbarna kalciteres márga van. A 4. mag részletes leírása: vörös árnyalatú, fehéres szürke, kemény, rétegzetlen, max. 5 cm átmérőjű, közepesen koptatott kvarcporfir és metamorfit kőzet kavicsokat tartalmazó osztályozatlan homokkő. A vékonycsiszolat alapján a kőzet nagyon kevés kovából és szericitből áll kötőanyagot tartal-

maz, törmelékdarabjai jól koptatottak, de osztályozatlanok, 0,5–2 mm körüliek. A mikroszkópos méretű kavicsok között uralkodik az önálló, nem mozaikstruktúrák, de unduláló kioltású kvarc, kevésbé koptatott mozaikstruktúrák kvarcit és a hasonló méretű kvarcporfir, amely erősen átkristályosodott, jelenleg csak 0,01 mm körüli kvarc- és szericithalmazokból áll, néhány földpát utáni szericit pseudomorforált, alakatlan limonit foltokat tartalmaz. Makro- és mikrofaunát nem tartalmaz. Az 5. mag részletes leírása: vörös, zöld árnyalatú világosszürke, közepesen kemény, rétegzetlen, kovás, agyagos kötőanyagú finomszemű homokkő. A vékonycsiszolat alapján a kőzet bőséges szericitből és kovából álló kötőanyagot tartalmaz. Szemcséi enyhén nyúlt, egy irányba rendezett, önálló, nem mozaikstruktúrák kvarc, néha mozaikstruktúrák kvarcit anyagúak. Néhány átkristályosodott kvarcporfir alapanyagból álló kőzetdarabka is megfigyelhető. Makro- és makrofaunát nem tartalmaz (16. ábra).

Nagyszénás–Orosháza környékének mélyföldtani megismerésére, illetve szénhidrogén-kutatás céljából 1981-ben mélyítették le a Nagyszénás-3. (Nsz-3.) jelű fúrást 3500 m mélységig. Az 1981-ben elvégzett rétegvizsgálatok során a 2922–3500 m nyitott lyukszakaszból 16 mm átmérőjű fúvókán 295–300 bar nyomással nem mért mennyiségű, 105 °C-nál nagyobb hőmérsékletű forróvíz/gőz termelést kaptak. Ez és később a Fábánsebestyén-4. (Fáb-4.) jelű fúrásnál bekövetkezett forróvíz/gőz kitörés felhívta a figyelmet a környék neogén aljzatának geotermikus energiatárolási lehetőségeire. Ezért a Nsz-3. jelű fúrás 1991-ben újabb, viszonylag hosszú rétegvizsgálatot folytattak a tárolókapacitás megállapítására. A rétegvizsgálat folyamán a kútáram kezelhetősége és a vízkőkiválás elkerülése érdekében kettős szűkítést alkalmaztak. A kútfejfúvóka alkalmazása mellett a lefúvató vezeték végén szilárdságtanilag és áramlástanilag méretezett diafragmát szereltek fel. A gázfolyadék viszony megállapítására részáramot vezettek át a szeparátoron, az elkülönült vízfázis mennyiségét nyitott, téglatest alakú mérőtartályban mérték. A gáz-nemű közeget hűtőrendszeren vezették keresztül, ahol a vízgőztartalom kondenzálódott, majd a második szeparátoron leválasztva megmérték a gáz mennyiségét. A kúton ellenőrizték a kezdeti zárt rétegnyomás értékét, majd különböző fúvókák kapacitást mérték. A kútáram vízkövesedési hajlamának üzemi körülmények közötti tanulmányozása érdekében „vízkő-provokációs” műveletet hajtottak végre, amikor a rendszert szűkítés nélkül termeltették. A vizsgálatot nyomásemelkedés-méréssel fejezték be. A 3. táblázat tartalmazza a rétegvizsgálat termelési, nyomás- és hőmérsékletadatokat. A vizsgálat hőtechnikai elemzése alapján a fluidum valószínűleg 3165 méternél (T1 Jakabhegyi Homokkő Formáció) áramlott a kútba.



16. ábra. A Nsz-3. fúrás alsó részén feltárt földtani képződmények

A kapacitásmérést követően besajtolási profilt terveztek felvenni, azonban az OKGT ehhez nem járult hozzá. Ezután édesvízzel vízbesajtolási próbát végeztek 3 ütemben:

- ❑ 260 l/p ütem 325–355 bar 32 percig,
- ❑ 200 l/p ütem 351 bar 9 percig,
- ❑ 100 l/p ütem 325–340 bar 27 percig.

Ez a következőket jelenti:

- A vízbesajtolás az alsó triász Jakabhegyi Homokkő Formációba történt, amelynél $-4,6$ szkinhatást és $11,28$ mD ($11,28 \cdot 10^{-15}$ m²) áteresztőképességet mértek.
- 3165 m-ben a rétegnyomás 638 bar.
- Az édesvíz hidrosztatikus nyomása 3165 m-ben 316,5 bar.
- A 638 bar rétegnyomást az édesvíz 316,5 bar hidrosztatikus nyomása és 321,5 bar kútfejnyomás ellensúlyozta.
- Így a besajtolási nyomás:
 - 260 l/p ütemnél $355-321,5 = 33,5$ bar,
 - 200 l/p ütemnél $351-321,5 = 29,5$ bar,
 - 100 l/p ütemnél $340-321,5 = 18,5$ bar.
- Ez azt mutatja, hogy a rétegbe $\sim 20-35$ bar túlnyomással lehetett benyomni a vizet, amely igen kedvező érték.

Megjegyzés:

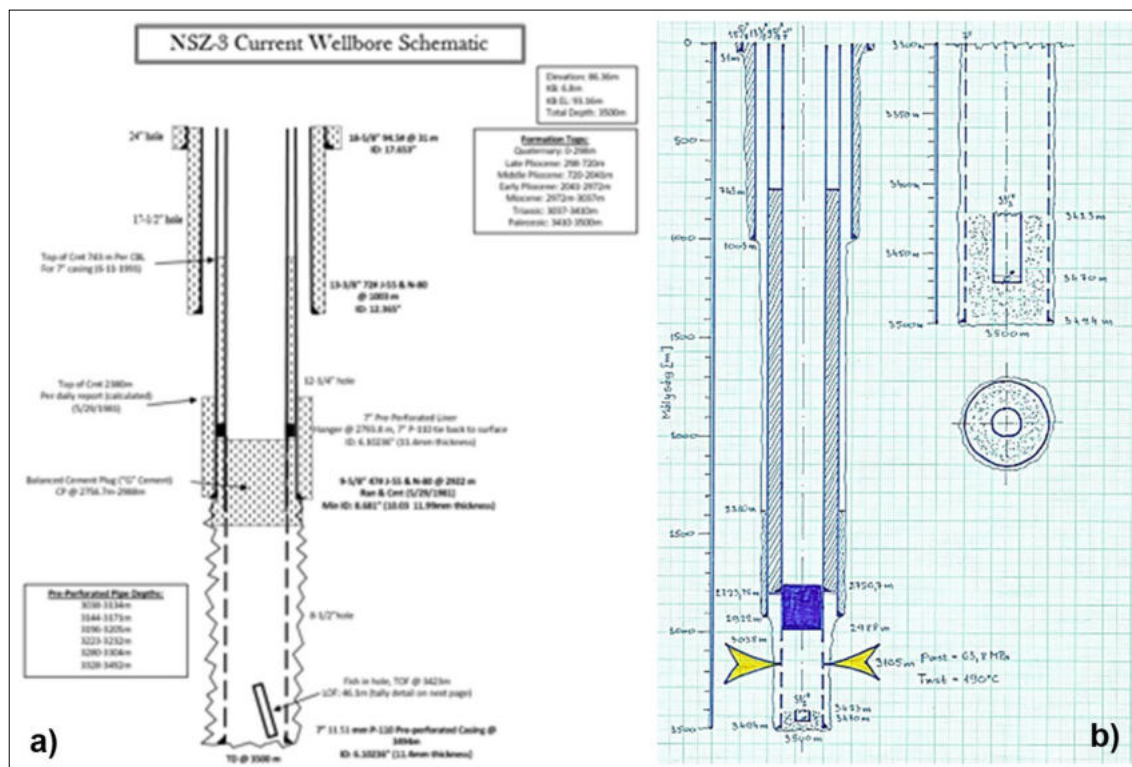
- Ilyen mélységbe történő vízvisszanyomásról ismereteink szerint nincs sem nemzetközi, sem pedig hazai adat, információ.

- ❑ Összesen csak 12 820 liter (12,82 m³) vizet nyomtak vissza a rétegbe.
- ❑ Hogy miként viselkedik ez a réteg nagy beszajtolási térfogatáram és mennyiség esetén, valamint mennyi ideig lehet ilyen kis túlnyomással visszanyomni, ma senki sem tudja megmondani. Ehhez mindenféleképpen egy nagyobb mértékű (különböző mennyiségű, ütemű és idejű) beszajtolási próbát kell elvégezni.

A rétegvizsgálatot követően záró cementdugót helyeztek el 2988–2756,7 m között, amelynek zárásáról a 2,18 kg/dm³ sűrűségű iszap vízre történt kicserélésével győződtek meg, a cementdugó zárt. A 3 1/2" termelőcsövet kirakták, a kutat 2,18 kg/dm³ sűrűségű iszappal feltöltötték. A kútfej kiképzést követően a kútfej 120 bar nyomással zárt, majd a berendezés 1991. július 21-én leszerelt a kútról és azóta (több mint 35 éve) ott áll a kút változatlanul.

Általános vélemény:

- ❑ A 7" 32 lb/ft 11,51 mm P110 termelő/besajtoló bélésű belső nyomáshatára 859 bar, amely több mint kétszerese a várható besajtolási nyomásnak.
- ❑ Az előre réselt bélésűek mélysége:
 - 3038–3134 m
 - 3144–3171 m
 - 3196–3205 m
 - 3223–3232 m
 - 3280–3304 m
 - 3328–3492 m



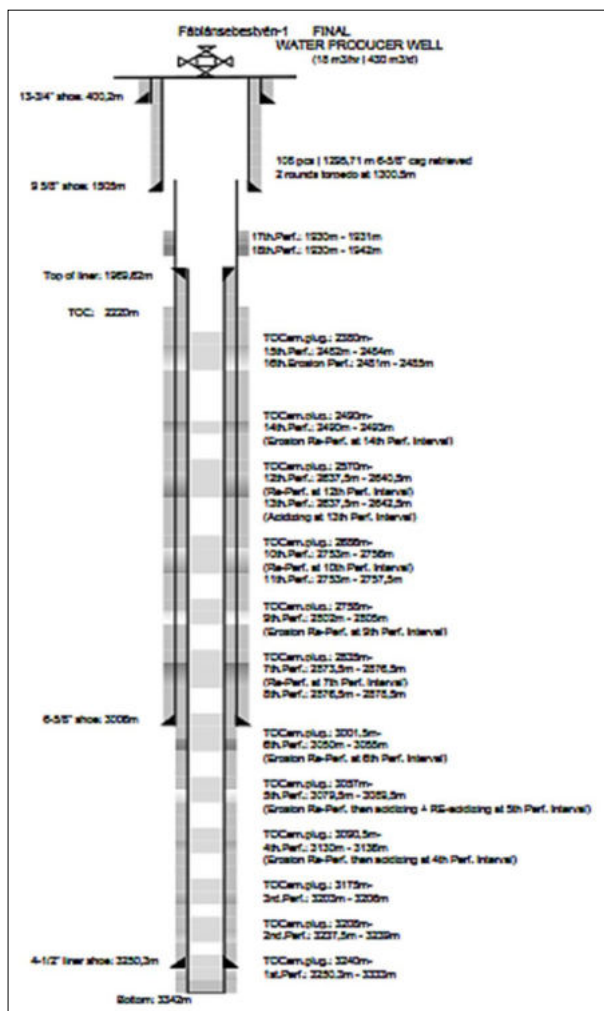
17. ábra. A Nsz-3. kút végleges állapota. a) A koncessziós társaság vázlatja. b) A tanulmány szerzőjének vázlatja

- ❑ A Jakabhegyi Homokkő Formáció 3037–3240 m között van, a fluidum belépése és vízbesajtolás mélysége valószínűleg 3165 m-ben történt, így az előre réselt bélésűcsővek helye megfelelő.
- ❑ A 2756,7–2988 m között lévő cementdugó kifúrása és az alatta lévő 7" bélésűcső 3423 m-ig történő kitisztítása után a kútszerkezet kész a vízbesajtolási kísérletre vagy a végleges vízbesajtolásra.
- ❑ A kútmunkálatokhoz szükséges folyadék sűrűsége 2,12 kg/l, amely 18 bar túlegyensúlyozást jelent.

A kút szerkezetét és kiképzését a 17. ábra szemlélteti.

Megállapítás: A Nagyszénás–3. (Nsz–3.) kút vízvisszasajtolásra alkalmas, illetve aránylag kis költséggel alkalmassá tehető.

Fábiánsebestyén–1. (Fáb–1.). A Fáb–1. fúrás a geofizikailag kimutatott szeizmikus maximum legkedvezőbb pontján mélyült 1965-ben 3342 m talpmélységig. A rétegvizsgálatokra 1966–1968-ban került sor. A



18. ábra. A Fáb–1. kút végleges állapota

rétegvizsgálatok után minden perforáció fölé záró-elválasztó cementdugót helyeztek el.

Végleges kútállapot:

- ❑ Legutolsó cementdugó teteje: 2380 m.
- ❑ Nyitott perforáció: 1930–1942 m.
- ❑ 6 5/8" bélésűcsövet 1300 m-ig kimentették.
- ❑ A kútban víz van.
- ❑ 105,3 m hosszú 2 3/8" termelőcsövet akasztották a 9 5/8" bélésűcsőfejbe
- ❑ Csőfej: 13 3/4" alapperem, 350 bar nyomáshatárú 9 5/8" bélésűcsőfej, szögperem és 1 db 2" tolózár (18. ábra).

Általános vélemény:

- ❑ Az 1930–1942 m felső pannon rétegből a kút víztermelésre kiképezhető.
- ❑ A sok perforáció és a nyitott 9 5/8"–6 5/8" gyűrűstér miatt a kút egyéb célra nem használható fel.

Megállapítás: A Fábiánsebestyén–1. (Fáb–1.) kút vízvisszasajtolásra nem alkalmas.

Fábiánsebestyén–2. (Fáb–2.). A Fáb–2. fúrás 1965–1966-ban mélyült 3259 m talpmélységig, a rétegvizsgálatokra 1966–1967-ben került sor. A rétegvizsgálatok után minden perforáció fölé záró elválasztó cementdugót helyeztek el.

Végleges kútállapot:

- ❑ 6 5/8" bélésűcsövet torpedózással 1279,2 m-ig kimentették.
- ❑ A kútban 1,25 kg/l sűrűségű öblítőiszap van.
- ❑ Záró cementdugó teteje 1278 m
- ❑ A 2 7/8" termelőcsövet kirakták
- ❑ Csőfej: 9 5/8" bélésűcsővön csősapka 1 db 2" tolózár

Általános vélemény:

- ❑ A felső pannon rétegből a kút víztermelésre kiképezhető.
- ❑ A sok perforáció és a sérült 9 5/8" bélésűcső miatt a kút egyéb célra nem használható fel

Megállapítás: A Fábiánsebestyén–2. (Fáb–2.) kút vízvisszasajtolásra nem alkalmas.

Fábiánsebestyén–3. (Fáb–3.). A Fáb–3. fúrást 1967–1968-ban mélyítették le 3600 m talpmélységig, majd 1968-ban és 1971–1972-ben vizsgálták ki. A rétegvizsgálatok után minden perforáció fölé záró elválasztó cementdugót helyeztek el.

A rétegvizsgálatok során a kútban maradt:

- ❑ 3584 m-ben 18 db perforátor üveggamra és 18 db fa távtartó.
- ❑ 3509 m-ben 2 db 8 m hosszú 10 mm átmérőjű gömbvas és tartókengyel.

- ❑ A kút 1987. április 4-vel felszámolták és a végleges állapota:
 - A 9 5/8" béléscső 624–625 m között sérült.
 - A 7" béléscsővet 1667,5 m mélységben torpedózással elvágták és kiépítették.
 - Záró cementdugót helyeztek el 1682–1616,5 m között.
 - A kút 1,30 kg/l sűrűségű öblítőiszappal feltöltötték.
 - A béléscsőfejet leszerelték.
 - A 13 3/8" béléscsőre túszeleppel ellátott acél csősapkát hegesztettek fel a talajszinttől 1 m mélységben.
 - A betonlapot feltörték és elszállították.
 - A fúrasi telephelyet rekultiválták.

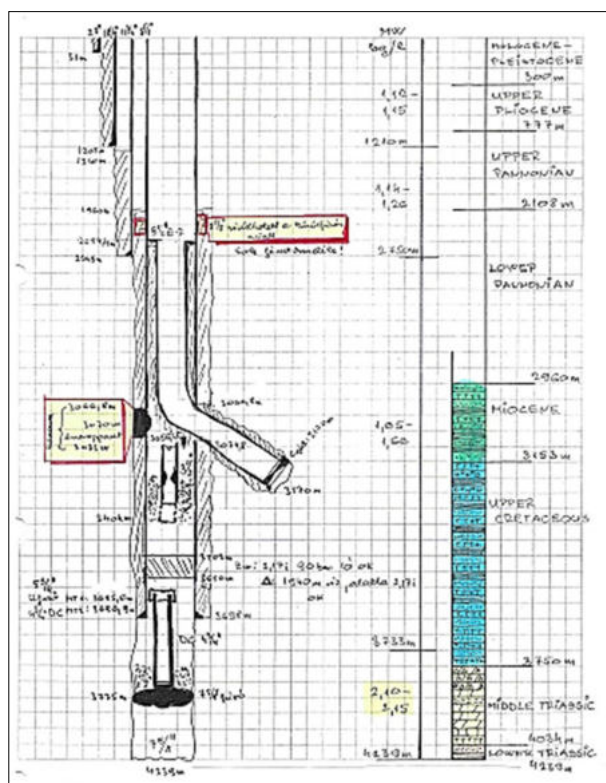
Megállapítás: A Fábiánsebestyén–3. (Fáb–3.) kút vízviszsasajtolásra nem alkalmas.

Fábiánsebestyén–4. (Fáb–4.). A kitörés felszámolása utáni rétegvizsgálatra 1986. szeptember 26-án költözött a lyukbefejező berendezés a kútra. A kút 3508 m-ig (cementdugó tető) kitisztították 7 5/8" háromgörgős fúróval, majd 3404 m-ig beépített 3 1/2" termelőcsővel nyomásos és 2120 m-es nivósökkentéses zárásvizsgálatot végeztek. A zárásvizsgálat közben a termelőcső megszorult. A vitlás ólom mintavéon lévő nyomok a termelőcső összeroppanására utaltak. A termelőcsövet torpedó segítségével 3056,45 m-ben lecsavarták. A termelőcső további kimentése során

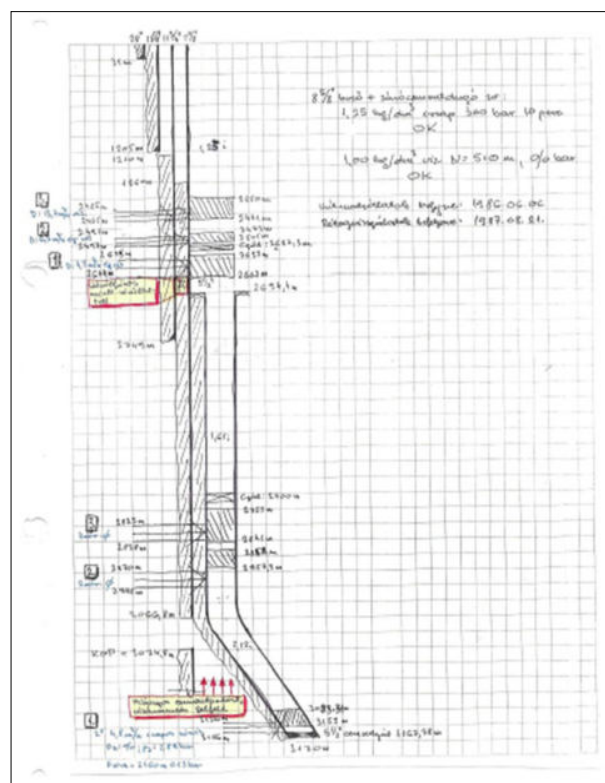
különböző mentőszerszámokkal 7 körülmarás és 8 fogási kísérlet történt eredménytelenül. A 8 5/8" béléscsővön a körülmarók 3066,8–3073 m között ablakot martak és a béléscső összeroppan. Végül a béléscsővön 3066,8–3074,8 m között ablakot martak, amelyet felbővítettek. Ezután 7 5/8" háromgörgős fúróval 3170 m-ig melléfúrtak a felső triász tetejébe és a melléfúrt szakasz 5 1/2" béléscsővel 3170 m-ig lecsővezték. A béléscső (betétcső) akasztása E-2 típusú akasztóval 2694 m-ben történt, és a béléscsővet lecementezték (19. ábra).

A rétegvizsgálatok után minden perforáció fölé záró elválasztó cementdugót helyeztek el. Végleges záró cementdugót helyeztek el 2471–2350 m között, amelynek zárását nyomásos és nivósökkentéses zárásvizsgálattal ellenőrizték. A kút 1,25 kg/l sűrűségű öblítőiszappal feltöltötték. A kúton teljes kútfejszerelvény maradt. A lyukbefejező berendezés 1987. augusztus 21-én leszerelt a kútról és azóta (több mint 39 éve) ott áll változatlanul (20. ábra).

A felső kréta törmelékes összetlet a fúrás 3153 m-ben érte el, és 597 m vastagságban harántolta. Az összetlet alsó 50 m-e szürke, sötétszürke, maximálisan 20 cm átmérőjű, osztályozatlan, nem vagy alig kopotatott törmelékdarabokból álló dolomitbreccsa, konglomerátum. A kőzetben dolomitdarabok mellett kevés kvarchomokkő, vörös színű agyagkő és savanyú vulkáni törmelék is előfordul. A kötőanyag a felsorolt kőzetdarabok finomszemcsés (homok, aleurolit) málladéka: dolomitkristályklast, szeriéit, kvarc, kvarcit,

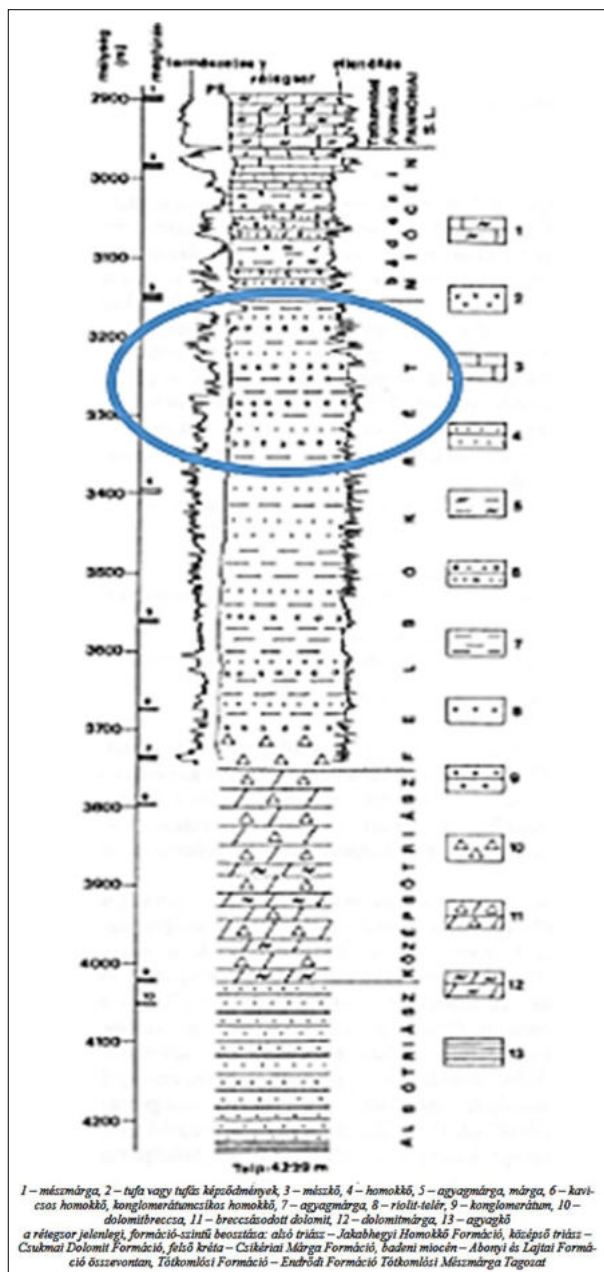


19. ábra. A Fáb–4. kút állapota rétegvizsgálat előtt



20. ábra. A Fáb–4. kút végleges állapota

csillámpikkelyek és agyag. Az összlet e fölötti része különböző vastagságú, sötétszürke agyagkő-, agyagmárga-, aleurolit- és szürke, világosszürke homokkő-, kavicsos homokkőrétegek különböző arányú váltakozásából áll, több helyen közbetelepülten konglomerátumrétegekkel. Az összletre ritmusos litológiai heterogenitás jellemző, a kőzetek préseltek, gyakoriak bennük a csúszási felületek. A törmelékes összletbe helyenként riolittelérek nyomultak, amelyek kora miocén vagy esetleg bizonytalanul felső eocénbe sorolt riolit vulkánitokhoz tartozhatnak. A néhol megjelenő riolituffa bemosott, esetleg távoli vulkáni kitörésből származik, és az üledékes részekkel egykorú. A változó mértékben koptatott kavics és homokszemcsék anyaga metamorf eredetű kvarc, kvarcit, metamorfit,



21. ábra. A Fáb-4. fúrás alsó részén feltárt földtani képződmények

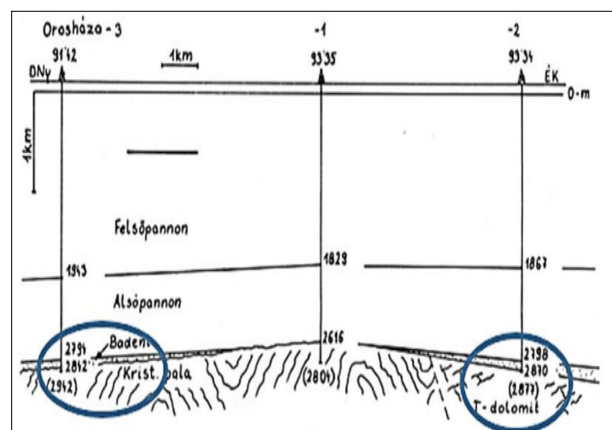
karbonát kőzetek, savanyú vulkáni törmelék, alsó triász homokkő, földpát, muszkovitpikkelyek. Ebbe a felső kréta összlet felső részébe hatolt be ~15 m-t a melléfúrás, és ez adott a rétegvizsgálat során 4 m³/nap sós vizet (21. ábra).

Általános vélemény:

- ❑ A kút komoly, költséges és sok bizonytalansággal terhelt kútmunkálatokkal vízviszasajtoló kúttá képezhető ki.
- ❑ A kútkiképzés főbb lépései:
 - 8 5/8" béléscsőben lévő cementdugók kifúrása
 - 5 1/2" béléscső kitoldása felszínig és elcemen-
tezése
 - 5 1/2" béléscsőben lévő cementgát és ce-
mentdugók kifúrása a 3167,78 m-ben lévő
cementgátig
 - 5 1/2" béléscsőben lévő perforációk kizárása
nyomásos cementdugókkal
 - kút kitisztítása 4 1/2" fúróval 3170 m talp-
mélységig
 - visszasajtolási vizsgálat
 - ha elegendő a nyitott szakasz: 3 1/2" előre-
perforált vagy réselt termelőcső beakasztása
 - ha nem elegendő a nyitott szakasz: tovább-
fúrás 4 1/2" fúróval és 3 1/2" előreperforált
vagy réselt termelőcső beakasztása

Megállapítás: A Fábiánsebestyén-4. (Fáb-4.) kút vízviszasajtolásra alkalmas lehet, illetve komoly, költséges és sok bizonytalansággal terhelt kútmunkálatokkal alkalmassá tehető.

Orosháza-1. (Oros-1.). A Battonya-Pusztaföldvár medencealjzati magas rögvonulat folytatódik ÉNy felé, a gravitációs mérések szerint ezen a szeizmikus mérések több kisebb záródó kiemelkedést jeleztek. Ezeket a medencealjzatban levő magasabb rögeknek vélték, és ezeken mélyültek az orosházi kutatófúrások. Fúrási tevékenység Orosházán a középső medencealjzati kiemelkedésen mélyült az Oros-1., innen K-re az Oros-2. és DK-re az Oros-3. fúrás, egy-egy



22. ábra. Az Orosházi fúrások DNy-ÉK földtani metszete

szeizmikus kiemelkedésen. Az Oros–1. és –2. fúrás 1979-ben, az Oros–3. 1980-ban mélyült (22. ábra).

Az orosházi fúrások rétegsorában a negyedidőszak szárazföldi-folyami homok, agyag, aprókavicsos homok. A pliocén tarka agyag, homokos agyag, vastagabb homokrétegek, lignites tözeges csíkok. A felső pannon homokos agyag, agyagos homok sűrű változása és néhány vastagabb homokrég. Lent vastagabb homokpadok (Törteli Formáció). Az alsó pannon homokpados agyagmárga, finomszemű csillámos homokkő vékony sötétszürke homokrétegekkel. Lefelé átmegy világosszürke márga-, mészmárgarétegekbe. Szarmata üledék nem volt kimutatható. A középső miocén bádeni emelet szürke, zöldesszürke márga és konglomerátum. A neogén alatt diszkordánsan triász dolomit és dolomitbreccsa következik, kisebb elterjedésben, mint lepusztulási maradék. Végül a kristályos alaphegység változatos kőzetei következnek: szericitpala, kvarcit, antracitos csillámpala és gneisz. Utóbbi zöldesszürke, sötétszürke, rendszerint bontott kőzet, kvarcit erekkel-lencsékkel, palás szerkezetű, benne kvarc, földpát és csillám ismerhető fel (3. táblázat).

Az Oros–1. fúrást 1979-ben mélyítették le 2804 m talpmélységig, majd 1980-ban vizsgálták ki. A 2616 m-ig tartó alsó pannon rétegek után egyből a kristályos alaphegység következik, amelybe 2804 m-ig (188 métert) fúrtak bele. Sem a középső miocén bádeni emelet márga és konglomerátum, sem pedig a triász dolomit- és dolomitbreccsa-rétegek nem találhatók. A rétegvizsgálatok után minden perforáció fölé záró elválasztó cementdugót helyeztek el.

Végleges kútállapot:

- ❑ 7" bélésű csövet 1303,7 m-ig visszanyerték,
- ❑ 9 5/8" bélésű csövet 256,94 m-ig visszanyerték,
- ❑ a kútban 1,25 kg/l sűrűségű öblítőiszap van,
- ❑ záró cementdugó teteje 195 m,
- ❑ a bélésű csőfejet leszerelték,
- ❑ a 13 3/8" bélésű csövön csősapka van tűszeleppel.

Általános vélemény:

- ❑ A sok perforáció és a visszanyert 13 3/8" és 9 5/8" bélésű csövek hiánya miatt a kút semmilyen célra sem használható fel.
- ❑ A paleozoikum tetején elvégzett sikertelen rétegrepsztes miatt nincs információ a zöldesszürke, erősen mállott, bontott és breccsásodott, palás elválású csillámpala (1. mag) nyelőképességéről.
- ❑ Az alsó nyitott szakaszban lévő tömött, sötét, feketés szürke gránátos, biotitos csillámpalába (2. mag) nem lehet visszasajtolni.

Megállapítás: Az Orosháza–1. (Oros–1.) kút víz-visszasajtolásra nem alkalmas.

Orosháza–2. (Oros–2.). Az Oros–2. fúrást 1979–1980-ban mélyítették le 2877 m talpmélységig, majd 1980–1981-ben vizsgálták ki.

Fúrás folyamán fellépő nehézségek:

- ❑ A 8 1/2" szelvény fúrásakor 2825 m-től jelentkező gyakori gázbelépés miatt sűrűn kellett az előfúrást abbahagyni, fúrólyuk egyensúly-helyreállítást és öblítőiszap-sűrűség-növelést kellett végrehajtani. 2864 m talpmélységnél fúrószár beépítése közben 2806 m szerszámvégállásnál egy karmantyú szétszakadt, és a fúrószerszám a fúrólyukba zuhant. Hosszan tartó mentési munkálatok után a mentéssel 2169,46 m mentendő tetőnél felhagytak. Cementdugók elhelyezése után a 8 1/2" szelvényrel melléfúrtak 2063 m-től 2810 m-ig, ahol ismét jelentkezett a gázosodás.
- ❑ A 2805 m-ig beépített 7" bélésű cső cementezése előtti öblítéskor részleges, majd teljes iszapvesztés lépett fel. A cementezés közben is végig iszapvesztés volt. A cementpalást tetőt 2092 m-ben találták.
- ❑ A 2877 m-ig tartó 6" szelvény fúrása közben is gyakori gázbelépésekkel küzdöttek (fúrólyuk egyensúly-helyreállítás, öblítőiszap-sűrűség-növelés). Végül is 2,20 kg/l sűrűségű öblítőiszappal tudták a fúrást befejezni.
- ❑ A 4 1/2" bélésű cső (betétcső) cementezése folyamán teljes folyadékvesztés lépett fel, az összes cementtejet elnyelte a réteg. Így a 4 1/2" bélésű cső mögött nincs cementpalást. A 7"–4 1/2" gyűrűstér lezárása érdekében 2703 m-től nyomásos cementdugót helyeztek el. A cementdugó tetejét 2652 m-ben találták meg.

Elvégzett rétegvizsgálat: csak egy rétegvizsgálatot végeztek el, a 4 1/2" bélésű cső (betétcső) mögötti elcementezetlen nyitott szakasz vizsgálatát. Ennek eredménye: 8 mm fűvókán 15 8000 m³/nap éghető gáz, 330 m³/nap 14,9 g/l sótartalmú 90 °C-os víz 162 bar nyomással.

Végleges kútállapot:

- ❑ A kút 2,20 kg/l sűrűségű öblítőiszappal feltöltötték.
- ❑ A 7" bélésű csőben záró cementdugót helyeztek el, a cementdugótető 276,5 m.
- ❑ A kútfejszerelvényt eltávolították, a 13 3/8" bélésű csőre 1"-es tűszeleppel ellátott csősapkát helyeztek.

3. táblázat. Az orosházi fúrások főbb földtani adatai

Fúrás	Fa.	Q.	L.	Fp.	Ap.	Bádeni	T.	Krist.	Megjegyzés
Oros-1	93,35	331	949	1829	2616	-	-	(2804)	
-2	93,34	360		1867	2798	2870	(2877)		gáznyom
-3	91,42	365		1943	2794	2842	-	(2942)	*

- ❑ Béléscső visszanyerésére, betonlap feltörésére, akna betemetésére, a terület rekultivációjáról nincs információ.

Általános vélemény:

- ❑ A 7" béléscsövet az alsó pannon és triász határában helyezték el. Ebben a mélységben szürke, rétegzetlen, tömött finomszemű homokkő és szürke, rétegzetlen, tömött, kemény, maximum 5 cm átmérőjű, alig koptatott metamorfit kavicsokat tartalmazó, agyagos kötőanyagú konglomerátum és breccsa van (1. mag).
- ❑ A 8 1/2" szelvény fúrása közben az 1,68–1,70 kg/l sűrűségű öblítőfolyadék dinamikus nyomását a réteg még elbírta. Azonban, a 8 1/2" fűrőlyuk és 7" béléscső között lévő szűk gyűrűstérben a súrlódási nyomásvesztés meg-növekedett, ezzel az öblítőfolyadék dinamikus nyomása is megnőtt, és ezt a nyomást a réteg már nem bírta el. A réteg felrepedt, és ezért következett be a 7" béléscső cementezése előtti öblítéskor a részleges és teljes, majd cementezés közbeni teljes folyadékvesztés.
- ❑ A 6" szelvény fúrásakor 2820 m-től már dolomit volt, végig a 2877 m végleges talpmélységig. A szürke, sötétszürke dolomit tektonikailag erősen igénybe vett breccsásodott anyagában néhol kvarcér található (2. mag).
- ❑ A 6" szelvény fúrása közben a 2,20 kg/l sűrűségű öblítőfolyadék dinamikus nyomását a réteg még elbírta. Azonban a 6" és 4 1/2" béléscső (betéteső) között lévő szűk gyűrűstérben a súrlódási nyomásvesztés meg-növekedett, ezzel az öblítőfolyadék dinamikus nyomása is megnőtt, és ezt a nyomást a réteg már nem bírta el. A réteg felrepedt, és cementezés közben teljes folyadékvesztés lépett fel, az összes cementet elnyelte a réteg.
- ❑ Tekintettel arra, hogy a triászban részleges és teljes folyadékvesztés lépett fel, valamint hogy a 4 1/2" béléscső mögött nincs cementpalást, a kút potenciális vízbesajtoló lehet.
- ❑ A kút komoly, költséges és sok bizonytalansággal terhelt kútmunkálatokkal vízvisszasajtoló kúttá képezhető ki.
- ❑ A kútkiképzés főbb lépései:
 - Csőfejszerelvény (13 3/8" alapperem, 9 5/8" és 7" béléscsőfej) visszaszerelése, a béléscsövek kitoldása, ültetése és zárásvizsgálata.
 - Záró cementdugó kifúrása.
 - Kúttisztítás a 2877 m-ben talpra ültetett 4 1/2" béléscső (betéteső) végéig.
 - 4 1/2" béléscső (betéteső) perforálása 2820–2877 m között.

- Visszasajtolási vizsgálat:
 - ha a visszasajtolás (nyomás, térfogatáram, mennyiség) megfelelő, a kút készen van,
 - ha a visszasajtolás nem megfelelő, a triász dolomit savas rétegrepszése.

Megállapítás: Az Orosháza–2. (Oros–2.) kút víz-visszasajtolásra alkalmas lehet, illetve komoly, költséges és sok bizonytalansággal terhelt kútmunkálatokkal alkalmassá tehető.

Orosháza–3. (Oros–3.). Az Oros–3. fúrást 1980-ban mélyítették le 2942 m talpmélységig, majd 1981-ben vizsgálták ki.

Korbeosztás: Fúrás folyamán fellépő nehézségek:

- ❑ A 8 1/2" szelvény fúrásakor 2791 m-ben fűrőlyukegyensúly-megbomlás következett be. A fűrőlyukegyensúly helyreállítása folyamán többször öblítőiszap-sűrűség-növelést kellett végrehajtani, cementdugókat kellett elhelyezni és végül a fűrőszerszám megszorult. Hosszadalmas mentési munkálatok (lecsavarás, körül-fúrás, fogás törrel stb.) után a fűrőszerszámot maradéktalanul sikerült kimenteni. A 2781 m-ig beépített 7" béléscső cementezése előtti öblítéskor részleges iszapvesztés lépett fel. A cementezés közben is végig iszapvesztés volt. A cementpalást tetőt 2140 m-ben találták.
- ❑ A 2942 m-ig tartó 5 7/8" szelvény fúrása közben is gyakori gázbelépésekkel küzdöttek (fűrőlyukegyensúly-helyreállítás, öblítőiszap-sűrűség-növelés). Végül 2,20 kg/l sűrűségű öblítőiszappal tudták a fúrást befejezni.
- ❑ A 4 1/2" béléscső (betéteső) cementezése zavartalan volt, az akasztó tetőig eredményesen felcementeztek.
- ❑ Az elvégzett rétegvizsgálatok folyamán minimális szén-dioxid- és sósvíz-beáramlás kaptak.

Végleges kútállapot:

- ❑ A kút 2,20 kg/l sűrűségű öblítőiszappal feltöltötték.
- ❑ A 7" béléscsövet 1725,6 m-ig visszanyerték.
- ❑ A 9 5/8" béléscsőben záró cementdugót helyeztek el, a cementdugó tető 1713 m.
- ❑ A kútfejszerelvényről és a terület rekultivációjáról nincs információ.

Általános vélemény:

- ❑ A 7" béléscsövet az alsó pannon és triász határában helyezték el. Ebben a mélységben feketésszürke, tömött, kemény, rétegzetlen márga, agyagmárga és mészmárga van, ritkán függőleges repedéseket és különböző irányú csúszási felületeket tartalmaz (1. mag).

- ❑ A 8 ½” szelvény fúrása közben az 1,76 kg/l sűrűségű öblítőfolyadék dinamikus nyomását a réteg még elbírta. Azonban a 8 ½” fűrőlyuk és 7” beléscső között lévő szűk gyűrűstérben a súrlódási nyomásveszteség megnövekedett, ezzel az öblítőfolyadék dinamikus nyomása is megnőtt, és ezt a nyomást a réteg már nem bírta el. A réteg felrepedt, és ezért következett be a 7” beléscső cementezése előtti öblítéskor a részleges, majd cementezés közbeni teljes folyadékveszteség.
- ❑ Az 5 7/8” szelvény fúrása alatt és a 4 ½” beléscső (betétcső) cementezése közben sem lépett fel a 2,20 kg/l sűrűségű öblítőiszappal folyadékveszteség. Ez arra utal, hogy ebben a szakaszban lévő rétegek (márga, mészmárga, agyagmárga, konglomerátum és csillámpala) (1., 2. és 3. mag) felrepedésre nem hajlamosak, vízvisszasajtolásra nem alkalmasak.

Megállapítás: Az Orosháza–3. (Oros–3.) kút víz-visszasajtolásra nem alkalmas.

Szentes-Északkelet–1. (Szentes-ÉK–1.). A Szentes-ÉK–1. fúrást 1986–1987-ben mélyítették le 3400 m talpmélységig, majd 1987-ben vizsgálták ki.

A fúrás folyamán fellépő nehézségek:

- ❑ A fúrás mélyítése 1,28 kg/l sűrűségű öblítőiszappal 2886 m-ig problémamentes volt, azonban ennél a talpnál előfúrás közben fűrőlyukegyensúly-megbomlás következett be.
- ❑ A kitörésgátló bezárása után az öblítőiszap sűrűségét 1,37 kg/l-re emelték, a fűrőszerszám megszorult, majd túlhűzés során szétszakadt. A fűrőlyukban maradt 315,24 m fűrőszerszám, a mentendő tető 2564,76 m volt. Közben a fűrőlyukegyensúly többször is megbomlott, s végül 1,65 kg/l sűrűségű öblítőiszappal sikerült helyreállítani.
- ❑ Ezt követően körülfúrással és lecsavarással 2792,44 m mentendő tetőig folytatták a mentést. Ekkor a további mentést kilátástalannak és gazdaságtalannak ítélték meg, és felhagytak vele. A fűrőlyukban maradt 89,02 m fűrőszerszám.
- ❑ A 2786,24 m-ben beépített ferdítópálya segítségével a fúrást kiferdítették. A 3400 m-ig tartó fúrás közben is gyakori gázbelépésekkel küzdöttek (fűrőlyukegyensúly-helyreállítás, öblítőiszap-sűrűsögnövelés). Végül 1,80 kg/l sűrűségű öblítőiszappal tudták a fúrást befejezni.
- ❑ A 7” cementező tolóhüvelyen történt cementezés folyamán a tolóhüvely kinyitáskor részleges, majd a II. lépcső cementezésekor teljes folyadékveszteség lépett fel.

Az elvégzett rétegvizsgálatok során 4000–4300 m³/nap éghető gázt, 0,8 m³ párlatot és 8,4–9,4 m³/nap 7,6–14,42 g/l sótartalmú vizet kaptak.

Végleges kútállapot:

- ❑ A 7” beléscsőbe záró cementdugót helyeztek el, cementdugó tető 2604,8 m.
- ❑ A kút 1,63 kg/l sűrűségű öblítőiszappal feltöltve.
- ❑ A 7” beléscsővet 706 m-ig visszanyerték.
- ❑ A beléscsőfejet a 9 5/8” alapperemig leszerelték, és az alapperemre védő peremet helyeztek.
- ❑ A kútra hévíztermelés céljából a szentesi Árpád Mgtsz. igényt tartott, azonban további sorsáról nincs információ.

Általános vélemény:

- ❑ A 8 ½” szelvény fúrása közben az 1,65–1,67 kg/l sűrűségű öblítőfolyadék dinamikus nyomását a réteg még elbírta. Azonban, a 8 ½” fűrőlyuk és 7” beléscső között lévő szűk gyűrűstérben a súrlódási nyomásveszteség megnövekedett, ezzel az öblítőfolyadék dinamikus nyomása is megnőtt, és ezt a nyomást a réteg már nem bírta el. A réteg felrepedt, és ezért következett be a 7” beléscső tolóhüvely kinyitáskor részleges, majd a II. lépcső cementezésekor teljes folyadékveszteség.
- ❑ Az 6” szelvény fúrása alatt nem lépett fel a 1,80 kg/l sűrűségű öblítőiszappal folyadékveszteség. Ez arra utal, hogy ebben a szakaszban lévő alsó pannon és felső kréta rétegek felrepedésre nem hajlamosak, vízvisszasajtolásra nem alkalmasak.

Megállapítás: Szentes-Északkelet–1. (Szentes-ÉK–1.) kút vízvisszasajtolásra nem alkalmas.

Hatodik válasz:

- ❑ A vízvisszasajtolásra nem alkalmas kutak: Nsz–1., Nsz–2., Fáb–1., Fáb–2., Fáb–3., Oros–1., Oros–3. és Szentes-ÉK–1.
- ❑ A Nsz–3. kút vízvisszasajtolásra alkalmas, illetve aránylag kis költséggel alkalmassá tehető.
- ❑ A Fáb–4. és az Oros–2. kút vízvisszasajtolásra alkalmas lehet, illetve komoly, költséges és sok bizonytalansággal terhelt kútmunkálatokkal alkalmassá tehető.

Befejezés

A geotermikus koncesszió megvalósításának előkészítése során számtalan kérdés merült fel, amelyek közül csak 6-ot mutatott be ez a dolgozat. Ezekre a kérdésekre adott válaszok – remélhetőleg – elősegítették a döntéshozatalt és a projekt megvalósítását.

Irodalom

- [1] Pap Sándor: Fábiansebestyén – Nagyszénás – Oros-háza környékének mélyföldtana. Földtani Közlöny 123/1, 69–93 (1993), Budapest
- [2] Körössy László: Az Alföld délkeleti része kőolaj- és földgázkutatásának eredményei. I. rész. Általános Földtani Szemle 29, 41–132, (2005), Budapest.
- [3] Stegena Lajos – Horváth Ferenc – Landy Kornél-né – Nagy Zoltán – Rumpler János: Nagy entalpiájú geotermikus rezervoárok Magyarországon. Földtani Közlöny 122/2–4, 195–208. (1992), Budapest.
- [4] Dr. Dövényi Péter – Dr. Árpási Miklós (2012–2013): Nagy entalpiájú geotermikus fluidum hasznosító fúrások Magyarországon. Kézirat. (2013).
- [5] Prof. Dr. Bobok Elemér – Dr. Tóth Anikó PhD (Miskolci Egyetem: Túlnyomásos tárolók művelésének lehetőségei. TÁMOP – 4.2.1.B – 10/2/KONV – 2010 – 0001 jelű projekt része.
- [6] Kőolajkutató Vállalat, Szolnok: Fáb–4. kutatófúrás rövid műszaki összefoglalása. Szolnok, 1987. december 14.
- [7] Buda Ernő: Magyarországi kőolaj-, földgáz-, széndioxid-, hévíz- és gőzkitörések eseteiről (1909–2000). Fábiansebestyén–4. 1985. Nagykanizsa, 2001. június 4.
- [8] Dr. Szűcs Péter: Hidrogeológia. 2. Esettanulmány. Fábiansebestyén. (2014), Digitális Tankönyvtár.
- [9] Dr. Bobok Elemér: Geotermikus energiatermelés környezeti hatásai. VII. Súlyos üzemi balesetek környezeti hatása. 1. A Fábiansebestyén–4. gőzkitörés. (2014), Digitális Tankönyvtár
- [10] TRP GEO Spa (GeoBlue Kft.): Fábiansebestyén – The investment, the site, the estimated re-injection power need and the drilling costs. (2010).
- [11] Reiniger Róbert (Deloitte Zrt.) (GeoBlue Kft.): Jelen-tés a Fábiansebestyén külterületén tervezett geotermi-kus energia hasznosítására. (2009).
- [12] Ónodi Tibor: Fábiansebestyén geotermikus lehetősé-gei. Kézirat. 2008. október 3.
- [13] Kocsis András: Geotermikus kút béléscső szerkezeté-nek tervezése. Diplomamunka. Miskolc, (2011).
- [14] Magyar Bányászati és Földtani Hivatal: Gádos geotermikus koncessziós terület komplex érzékenységi és terhelhetőségi vizsgálati jelentés. Budapest, 2012. október 30.
- [15] YouTube: Fábiansebestyeni gőzkitörés
- [16] YouTube: Kurca Televízió – Fábiansebestyén–4-es számú lefajtott gőzkút 2014-ben, 1–2. rész (Dr. Szabó György, Dr. Árpási Miklós, Farkas Sándor)
- [17] Árpási Miklós: Geovillamos áramtermelés. Forrás-oldali lehetőségek Magyarországon. Kézirat. 2015. május.
- [18] Bencsik István – Csaba József – Megyeri Mihály – Pap Sándor: Nedvesgőz-termelési lehetőség a Nagy-szénás–3. kútból. BKL Kőolaj és Földgáz 25. (125.) évf. 7. szám, 1992. július, 193–206.
- [19] id. Ösz Árpád: Fábiansebestyén–4 kút összefoglalása és rajzai. Kézirat (2009).
- [20] Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal: Magyarország geotermikus felmérése, 2016. Buda-pest. Szerkesztette: dr. Tóth Anikó Nóra.
- [21] Kútönyvek. Kőolajkutató Vállalat, Szolnok, (2009).
- [22] Kun Éva – Zilahi-Sebess László – Szanyi János: Bat-tonya–Pusztaföldvári–hát térségének nagy entalpiájú geotermikusenergia-vagyona (I. rész): Hidrodinami-kai és hőtraszport modell. Földtani Közlöny, 152/1, 53–76., (2022), Budapest. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2022.152.1.53>
- [23] Szanyi János – Bíró Lóránt: Nagy entalpiájú geoter-mikus rendszerek. Szegedi Tudományegyetem.
- [24] Bada Gábor – Dombrádi Endre – Mike Peffer – Bla-ine Saathoff: Gádos Geothermal Concession – A breakthrough in geothermal energy utilization in Hungary?
- [25] Dr. Beke János: Műszaki hőtan mérnököknek. Mező-gazdasági Szaktudás Kiadó, (2000), Budapest.
- [26] Dr. Vitális György. Magyarország vízföldtana. OSKAR Kiadó, (2012), Budapest.
- [27] Peter Aird: Drilling and testing hot high pressure well. Oilfield Review, April/July 1993, 15–32.
- [28] Kriti Yadav – Anirbid Sircar: Review of deep drilling techniques for high entalpy geothermal resevoirs. International Journal of Advanced Research (IJAR), June 2017, 2359–2370. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/4681>
- [29] Vangala Srimannarayana: High Pressure High Tem-perature Well Completion and Problems.
- [30] Alejandro Obando: High-pressure, high temperature technologies. Oilfield Review, 2008, Autumn, 46–60.
- [31] Santana Das: HPHT101 – What petroleum engineers and geoscientists should know about high pressure high temperature environment. Canadian Research & Development Center of Sciences and Cultures. Vol. 4, No. 2, (2012), 36–60.

„Bányász hazája merre van?” – avagy Carl Stegmayer és a harmadik bányászhimnusz* – 1. rész

“Where Is the Miner’s Homeland?” – or Carl Stegmayer and the Third Miners’ Anthem – Part 1

PÁLINKÁS RÓBERT GUSZTÁV

E-mail: palinkas@vipmail.hu



200 évvel ezelőtt, Bécsben, kis példányszámban megjelent egy alig ismert fiatal osztrák költő és egyben Selmezbányán végzett bányamérnök, Carl Stegmayer bányász témájú vers- és dalgyűjteménye *Klänge aus der Teufe* (*Hangok a mélyből*) címmel [1], amely azonban a maga korában viszonylag visszhangtalan maradt az irodalmi életben, s alighanem csak egy szűk szakmai közösség, a selmezbányai Akadémia diáksága és tanárai, illetve az onnan kikerült szakemberek számára bírt egyáltalán jelentőséggel. Véleményem szerint azonban számunkra, mai utódok számára ez már mégis elegendő indok lehet arra, hogy egy kis figyelmet szenteljünk ennek a dalgyűjteménynek, s megismerkedjünk annak szerzőjével és a kiadvány tartalmával. A jelen cikk célja tehát röviden bemutatni Carl Stegmayer életét, írói munkásságát, majd pedig e bányászdalgyűjtemény összetételét, jelentőségét és utóhatását a selmeci eredetű dalkultúrára, továbbá e dalanyag egyik érdekes darabjának kapcsán felvázolni a bányászhimnuszok fejlődéstörténetének eddig ismeretlen szeletét.

A cikk apropóját az adja – tekintettel e bányászdalgyűjtemény első kiadásának 1826-os évi bicentenáriumára –, hogy az idén megjelent egy magyar nyelvű kötet [2], amely tartalmazza Carl Stegmayer 30 bányászdalának és további 20, korabeli újságokban és almanachokban megjelent költeményének műfordítását kottákkal együtt, kiegészítve a szerző életrajzára, munkásságára és a selmeci dalhagyományra vonatkozó tanulmányokkal, valamint a lírai művekhez kapcsolódó számos kiegészítő magyarázattal.

Kulcsszavak: Carl Stegmayer, bányászdalgyűjtemény, bányászhimnuszok története

Two hundred years ago, a collection of mining-themed poems and songs titled *Klänge aus der Teufe* (*Sounds from the Depths*) [1] was published in a limited edition in Vienna. Its author, Carl Stegmayer, was a little-known young Austrian poet who had also graduated as a mining engineer from the Academy in Selmezbánya. At the time, the work garnered little attention in literary circles, holding significance if any only for a narrow professional community: the students and faculty of the Selmezbánya Academy and the professionals who had graduated from it. In my view, however, this provides sufficient reason for us to devote some attention to this song collection and to familiarize ourselves with its author and contents. The aim of this article is, therefore, to briefly outline Carl Stegmayer’s life and literary career, as well as the composition, significance, and legacy of this mining song collection regarding the song culture originating from Selmezbánya; furthermore, by examining one interesting piece from the collection, it seeks to shed light on a previously unknown aspect of the history of mining anthems.

The occasion for this article is the publication this year – in anticipation of the 2026 bicentenary of the first edition of this mining song collection – of a Hungarian-language volume [2] containing translations (completed with musical scores) of 30 mining songs and 20 additional poems by Carl Stegmayer originally published in contemporary newspapers and almanacs; the volume is further supplemented by studies on the author’s life and work and the song tradition of Selmec, as well as numerous explanatory notes relating to the lyrical pieces.

Keywords: Carl Stegmayer, collection of miners’ songs, history of miners’ hymns

* A jelen írás a XVII. Ózdi Ipari Örökségvédelmi Konferencia (2026. 05. 22.), ill. a XXXVI. Selmeczi Diák Napok (2026. 06. 03.) rendezvényén tartott hagyománytörténeti fórum keretében elhangzott előadások átszerkesztett változata, felhasználva a „Bányász hazája merre van? – avagy egy selmeci dalunk 200 éves története” c. tanulmányban (2018, 4. bővített kiadás) foglaltakat.

Carl Stegmayer rövid életrajza [2]

Carl Stegmayer (1800–1862) Bécsben született egy jómódú polgári családban. Édesapja Matthäus Stegmayer (1771–1820), a neves színpadi színész, rendező és kórusvezető révén, két öccsével (Ferdinanddal és Wilhelmmel) együtt hamar megismerkedtek a színjátás és az irodalom szépségeivel és a főváros művészvilágával. Carl ennek megfelelően színvonalas képzésben részesült miközben irodalmi-színészi pályára készült. Ehhez a tehetsége is megvolt; szívesen lépett fel korabeli színpadi művekben, mint gyerekszínész, és már 18 éves korától jelentek meg nyomtatásban versei a helyi lapokban.

Ugyanakkor az ifjú Carl egy nyughatatlan és bohém alkat volt, aki tanulmányai mellett szívesen töltötte idejét hasonszórú barátaival és kapcsolatot tartott fenn a bécsi ifjúság diáktársaságaival is. Az ilyen baráti körben szervezett összejövetelek (sörestek) azonban, abban a korban egy korábbi nagypolitikai szigorítás (az ún. Karlsbadi Dekrétumok) hatására tiltottá váltak, mint ahogy sok egyéb mellett a hagyományos diáknóták éneklése vagy daloskönyvek birtoklása is büntetendőnek számított. Azonban az ifjúságot ez nyilván nem tántorította el attól, hogy sok évszázados szokásainak megfelelően, időnként össze-összejöjjen a város határában egy fogadóban. Ám ismeretlen feljelentők információi alapján, egy ilyen mulatós este alkalmával, 1820 januárjában az osztrák csendőrség lecsapott a társaságra, amelynek következménye az lett, hogy Stegmayert és számos diáktársát letartóztatták, kihallgatták és különböző súlyú büntetéseket szabtak ki rájuk, illetve mint „felforgató” egyéneket nyilvántartásba is vették. Talán épp ez utóbbi volt a legfájóbb retorzió számukra, hiszen ez, az így megbélyegzett személyek számára a korabeli viszonyok között egy életre szóló hátrányt jelenthetett; Stegmayert például kicsapták az egyetemről, de volt, akit egy év elzárásra ítélték, és sajnos olyan is akadt, aki az üldöztetés hatására, nagy reménytelenségében öngyilkos lett.

A további következmények és családja rosszallása elől Stegmayer a rövid életű és picinyke Krakói Köztársaságba menekült, ahol jómódú családokhoz szegődve három évet töltött különféle adminisztratív teendők ellátásával. Egy ilyen megbízatása alkalmával látogatott el a wieliczka-i sóbányákhoz is, ahol a hatalmas bányák misztikus-félelmetes világa megigézte és elhatározta, hogy jobban is megismerkedik e szakma alapjaival, így felvételi kérelmet nyújtott be a Selmecbányai Akadémiára. Érdekes módon korábbi előlétele ellenére kérelmét elfogadták, és 1823-ban megkezdhetette tanulmányait.

A bécsi, szerencsétlen kimenetelű események hatására végül is Stegmayer élete immár az irodalom felől a bányászat irányába terelődött és hálás lehetett a sors-



1. ábra. Carl Stegmayer arcképe az 1830-as évekből [3]

nak, hogy abban egy új lehetőséghez jutott. Ő azonban nyughatatlan természetét itt sem tudta meghazudtolni, s német ajkú barátaival megalapították saját Burschenschaft szervezetüket, a Deutsche Gesellschaft in Schemnitz-et, s ők lettek az akkori szóhasználat szerinti „flottisták”. A harsány társaság többször is összeütközésbe került a Selmecen már korábtól ott működő regionális, ill. nemzetiségi alapokon szerveződő diákegyletekkel, aminek újabb feljelentés lett a következménye, illetve Stegmayert két hét elzárással is büntették. Mindezek ellenére 1826-ban sikerrel befejezte az akadémiai képzést és megszerezte minősítését, amivel már munkát is vállalhatott volna, ám a korábban szerzett „rossz pontok” miatt csak hosszas utánajarást követően 1827 őszén fogadták fel gyakoronoknak a bécsi törvényszék Montanisztikai Osztályára (Montanistischen Hofkammer), ahol aztán 1843-ig folyamatosan dolgozott.

Sajnos szakmai felkészültsége és szorgalma ellenére nem sikerült a közigazgatási ranglétrán előbbre jutnia és így fizetése is csak szűkös megélhetésre volt elegendő. Ennek ellenére – a hivatali munka szürke és unalmas mindennapjaival párhuzamosan – a szikár alkatú, szarkasztikus humorú Carl Stegmayer egy vidám-bohém fiatalember nagyvárosi életét élte, ahol esténként barátaival a szórakozásnak szentelték szabadidejüket. Számos anekdota maradt fenn arról, hogy miként verte el csekély keresetét meglepő baráti

összejöveleteken és különféle multságokon, illetve hogyan bosszantotta hivatali előjáróit azzal, hogy nem volt hajlandó idomulni a közszolgálat által megkívánt tiszteletadáshoz és eljárásrendekhez. A bécsi időszak ugyanakkor kifejezetten jó hatással volt alkotói energiáira, mert az irodalom és a színjátszás terén több műve is ekkoriban jelent meg nyomtatásban, illetve rendszeresen publikált verseket is olyan folyóiratokban, amelyekben számos más, korabeli osztrák költőbarátja is helyet kapott.

Mivel sajnálatos módon a merev hierarchikus közigazgatási szervezet nem viselte el az ilyen nehezen kezelhető, nonkonformista alakokat, így 1843-ban áthelyezték egy felső-ausztriai kisváros, Gmunden sóbányáihoz, ahol a helyi bányagazgatásban lett írnok. A Bécs nyüzsgő életétől távoli idilli kisváros képe és környékének természeti szépségei, valamint megannyi történelmi legendája később számos művében visszaköszön majd.

Az 1848/49-es forradalmi események Stegmayert is magukkal sodorták, s belépett az újjászerveződött Nemzeti Gárda kötelékébe, illetve több politikai beszédet tartott és szervezői tevékenységet fejtett ki a liberális eszmék érdekében. Ennek aztán a forradalmak leverésével ismét csak újabb negatív következményi lettek, mert most már egy hivatali büntetés (Strafversetzung) keretében, helyezték még távolabbi szolgálati helyre, az Innsbruck melletti Hall városába, ahol a helyi sóbányák adminisztratív feladati kellett intéznie. Ez azonban csak 1851-ig tartott, mert ekkora lezárultak azok a fegyelmi eljárások, amelyek eredményeként véglegesen elbocsátották köztisztviselői állásából, méghozzá állami nyugdíjjogosultságának megvonásával együtt.

E reménytelen helyzetéből Linz városában próbált meg kivergődni, ahol alkalmi irodalmi és színházi munkák révén próbálta fenntartani magát és immár családját is, ám e megbízások nem úgy alakultak, mint remélte, így csak adósságait dagasztotta, miközben régi barátai jóindulatára és kölcsöneire kellett hagyatkoznia.

E sanyarú helyzetből egy váratlan lehetőség mentette ki, ugyanis 1854-ben felkérést kapott egy schladmingeni ércbánya igazgatói székére, ugyanis a bánya tulajdonosa nem sokkal korábban elhunyt és a család örökösei nem boldogultak az összetett technológiai-gazdasági feladatokkal, ezért kerestek egy felkészült szakembert az üzem vezetésére. Az itt töltött évek reményt adtak arra Stegmayernek, hogy végre rendezze korábbi adósságait és egyenesbe hozza a család anyagi helyzetét. Sajnos a bánya kimerülésével és a gazdasági helyzet megváltozásával távoznia kellett a vállalatától, és újra csak a létbizonytalansággal kellett szembenéznie.

1859-ben családjával visszaköltözött Bécsbe, ahol ismét csak irodalmi és színházi munkákból próbálta fenntartani a család életszínvonalát, ez azonban itt sem sikerült, habár megannyi szakmai és szépirodalmi műve ebben az időszakban jelent meg. Végül is elfeledve és elszegényedve halt meg, miközben a felesége által kérvényezett állami nyugdíjra vonatkozó felülvizsgálati kérelmet is elutasították a hatóságok, így családjára is csak a nélkülözést hagyta.

Carl Stegmayer írói munkássága

Stegmayer sokoldalú szakember volt, aki több, egymástól független területen is kifejtette írói munkásságát, amelyek tulajdonképpen fiatalkorától kezdve élete végéig elkísérték. Ennek megfelelően nyomtatásban fennmaradt életműve is három nagy kategóriába sorolható.

1. Egyrészt, mint a bányagazgatásban és a bányajogban jártas szakember bányászati témájú, ám nemcsak a szakmai közönség, hanem a szélesebb nyilvánosság számára is szánt írásai jelentek meg még életében néhány könyv és számos szacikk formájában, amellet, hogy a közigazgatásban betöltött munkája részeként is leiratokat kellett készítenie a birodalom bányás és kohóüzemeinek tevékenységéről az azokat felügyelő bányahatóság részére. Bányászati tárgyú írásaiban tehát főleg a közvélemény és a nem szakmai döntéshozók számára igyekezett a bányászatot, mint szakmát bemutatni, valamint annak kereskedelmi-gazdasági és társadalmi viszonyait elemezve a szükséges fejlesztésekre, a modernizálások lehetőségeire és egyben szükségességére is rávilágítani.

Több kiadást is megért egyik ismeretterjesztő-népszerűsítő könyve a *Grundriß einer populären Bergwerkskunde zum Selbstunterrichte* [Egy népszerű bányásztudomány alapjai önképzés céljára], amelyet a nagy érdeklődésre való tekintettel az 1843-as kiadást követően már 1844-ben újra kinyomattak. Szintén népszerű volt az 1851-ben megjelent *Die Bergbaufrage: Ein Versuch zu ihrer Beantwortung vom Standpunkte der National-Oekonomie, Finanz und Politik* [A bányászat kérdése: Kísérlet a nemzetgazdaság, a pénzügyek és a politika szempontjából történő megválaszolására] című rövid, mindössze 60 oldalas kis könyv is, amely az alcímében is jelzett témákat taglalja, sőt napjainkból visszatekintve nagyon előremutatóan már a bányászat-kohászat környezetre gyakorolt hatásait és az ezzel összefüggő természetvédelmi kérdéseket is szóba hozva. Ezekon felül megemlítendő még az 1862-ben kiadott *Handbuch der Bergbaukunst für Jedermann: Mit*

einer Vorschule, worin das Wissensnötige der Gebirgskunde, Markscheidekunst und des Berggesetzes allgemeinfaßlich vorgetragen ist. [A bányászat kézikönyve mindenkinek: Előtanulmánnyal, mely közérthetően ismerteti a földtan, a bányamérés és a bányajog alapjait.] A fentebb kiemelt hosszabb írásokon túl műszaki-gazdasági szaklapokban is jelentek meg szép számmal rövidebb cikkei.

2. Stegmayer másik énjében a társadalom ügyei iránt érdeklődő és elkötelezett liberális szellemiségű, felvilágosult hazafi volt, aki szóban és írásban is mindig kiállt a politikai szabadságjogok, valamint a társadalom és az államberendezkedés megreformálásának szükségessége mellett. Ezek zömében rövidebb cikkek és pamfletek formájában láttak napvilágot, elsősorban különböző újságokban, illetve szóbeli agitációkban főként az 1848–49-es időszakban. Nagyobb lélegzetű kiadott munkája az 1849-ben megjelent *Die Radicalen* [A radikálisok] című színdarab, de emellett egybegyűjtve 1848-ban látott napvilágot néhány politikai előadásának anyaga a *Freie Vorträge, gesprochen im Volksvereine zu Gmunden* [A gmundeni népegyletben elhangzott kötetlen előadások] című kiadványban.
3. A bányászat és politika mellett azonban talán mégiscsak az irodalmi élet volt számára a legfontosabb közeg, ugyanis élete folyamán végi hű maradt fiatalkori elköteleződéséhez a színház és irodalom iránt. Ennek megfelelően szépirodalmi alkotásokkal, valamint részben a színjátszáshoz kapcsolódó feladatokkal és rövid publicisztikai írásokkal igyekezett a korabeli kulturális köztudatban jelen lenni, miközben mindhárom műnemben egyaránt alkotott.

Habár drámai művei csupán két kötetben jelentek meg: *Dramatische Dichtungen* [Drámai művek] (1836), *Die Schlacht bei Esseg* [Az essegi csata] (1843), ám számos (zömében külföldi kortárs) színpadi darab feldolgozását és átíratát készítette el, illetve lektorként is közreműködött egyéb szövegek korrektúrájában, de másféle feladatokat is vállalt a színpadra állítás folyamatában, ezekről azonban csak elszórt utalásokból (pl. hírlapok színházi tudósításaiból) értesülhetünk.

Prózai művei között az 1828-as kiadású, *Probiernadeln* [Próbátűk] című mesés-novella kötetben öt rövid történetet jelentetett meg egybegyűjtve, majd kisebb írásait, novelláit is kiadta *Novellen und Novelletten* [Kisregények és novellák] (1847) címmel. Ezen túlmenően számos rövidebb írása – például anekdoták, tör-

ténelmi pillanatképek, véleménycikkek és kritikák – jelent meg különböző folyóiratok lapjain, amelyek azonban sosem kerültek be a fentebbi-ekhez hasonló gyűjteményes kiadványokba.

Lírai műveinek összegyűjtött kiadására sem került sor sem életében, sem halálát követően. Egyetlen költeményeket tartalmazó, fiatalkori gyűjteményes kiadványa a bányászdalokat felvonultató *Klänge aus der Teufe* [Hangok a mélyből], amely viszont két kiadást is megért (1826-ban és kibővített formában 1836-ban). Mindemellett számos költeménye jelent meg elszórtan különféle folyóiratokban és a maguk korában igen kedvelt almanachokban.

A jelentős mennyiségű és szerteágazó irodalmi alkotás ellenére nyitott marad a kérdés, hogy a szerző neve miért is nem őrződött meg az utókor számára, mint arra érdemes író-költő? Már csak azért is, mert egykori barátai, a bécsi irodalmi kör kortársai közül többen (pl. Franz Grillparzer, Nikolaus Lenau) máig ott szerepelnek a szépirodalmi antológiák lapjain és bevonultak a világirodalom szintjén is jegyzett alkotók sorába.¹ Stegmayer sajnos sem életében sem halálát követően nem kapta meg a neki kijáró elismerést, sem anyagi, sem eszmei téren, ami kétségtelenül rányomta bélyegét világszemléletére is, és talán emiatt is alakult ki benne az a dacos-bohém attitűd, amely az életrajzában bemutatott reakciókkal igyekezett a vele szemben értetlenül álló hivatalok ellenségeségét valamennyire elviselhetővé tenni. Ez az elfeledettség abban is megmutatkozik, hogy néhány rövidebb, pár oldalas életrajzi kivonaton kívül nem írtak se életéről, se írásairól hosszabb tanulmányt és műveit is csak elvétve értékelték kritikusok; nem maradt benn az irodalomtudósok és az értő olvasók látókörében. Ebből fakad, hogy bár a bécsi központi levéltárban található Stegmayer hagyatékából fennmaradt kéziratos oldalak is nagyobb mennyiségben, ám ezek feldolgozása mind a mai napig csak kis részben történt meg.² Így nem tudhatjuk, hogy ezek között rejtőznek-e máig kiadatlan művek, mivel sajnos az irodalmárok, a művészettörténészek, de a bányász szakma történetével foglalkozók sem érezték eddig eléggé érdekes témának Stegmayer életét és írói munkásságát ahhoz, hogy behatóbban feltárják ezeket a lappangó forrásokat, illetve elvégezzék életművének átfogó bemutatását, vagy legalább szétszórt írásait rendezett kötetekben összegyűjtsék.

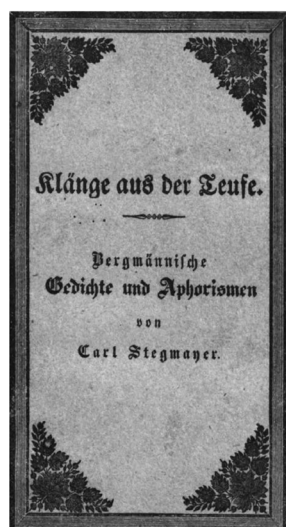
¹ Ismereteim szerint ugyanis Carl Stegmayer egyetlen műve sem szerepel a XX–XXI. századi német nyelvű irodalmi antológiákban.

² Stegmayer levelezésének egy része például már digitálizált formában is elérhető a <https://www.digital.wienbibliothek.at/> oldalon.

Hangok a mélyből

Az előzőekben ismertetett szerteágazó szak- és szépirói munkásságból a selmeci dalhagyomány iránt érdeklődők számára nyilvánvalóan a bányászdalokat tartalmazó kiadványa a legérdekesebb és legismertebb. A dalgyűjtemény *Klänge aus der Teufe* [Hangok a mélyből] címmel 1826-ban jelent meg Bécsben Leopold Grund nyomdájából [1]. A kiadvány alcíme (*Eine Sammlung bergmännischer Lieder und Gedichte*) szerint bányászdalok és költemények szerepelnek a kis könyvben. Aztán 10 évvel később, azonos címmel született egy kissé átszerkesztett és bővített kiadása is ennek a gyűjteménynek [4]. A bevezetőben említett, a bicentenáriumra megjelent fordításkötetben [2] e két kiadvány bányászdalai mind szerepelnek (2. ábra).

Az 1826-os kiadású kis könyv nyolc számozatlan oldalt követően 63 számozott oldalt tartalmaz, amelyből az 59. oldalig dalszövegek és egyéb költemények, a 60–63. oldalakon pedig a versekben felbukkanó, egyes bányászattal összefüggő kifejezések rövid magyarázata szerepel. Ennek megfelelően összesen 24 lírai művet tartalmaz, amelyek közül 19 dalszöveget, azaz dallamhivatkozással ellátott darabot, egy dallamhivatkozás nélküli verset és három bányászballadát, valamint a könyv legelején, ajánlasként, egy programadó verset tartalmaz. A 10 évvel később megjelent második kiadás (kibővítve és átszerkesztve) ezúttal Ferdinand Ulrich nyomdájában készült kétféle nyomdai változatban; egy igényesebb, illusztrált kivitelben 12 krajcárért, ill. egy egyszerűbb kötet 9 krajcárért. (Ezek mai reálértéken nagyon durva becsléssel kb. 11 000, ill. 15 000 Ft közötti árnak felelnek meg.) Ez a második kiadás már több, összesen 115 számozott oldalt tartalmaz, amelyből az első 6 számozatlan oldalt követően az



2. ábra. A Klänge aus der Teufe 1826-os és '36-os kiadásainak belső címlapjai [1, 4]

1–89. oldalakon lírai művek szerepelnek, majd a 90.-tól a 103. oldalig rövid, frappáns aforizmákat találunk, amelyet a 104. oldalon utószóként követ az 1826-os kiadványban még előszóként szereplő vers, végül pedig kilenc oldalon keresztül olyan bányászati szakkifejezések magyarázatát olvashatjuk, amelyek a költeményekben bukkantak fel, s nem feltétlenül közérthetőek a laikus olvasó számára. A kiadványban (az utószóval együtt) összesen 29 mű került publikálásra, amelyek közül hat a korábbi kiadásban nem szerepelt, ugyanakkor egy vers viszont kikerült ahhoz képest, vagyis nettóban ötten több lett a költemények darabszáma. De a mennyiségi növekedés mellett a '36-os kötetben a szövegek sorrendjét is megváltoztatta Stegmayer; pl. az Előszó szerepét betöltő versszak tagolás nélküli lírai szöveg (*Welch Grauen in der Teufe wohnet*), mely a '26-os kiadásban elsőként szerepelt, a '36-osban utolsó helyre került, mint Utószó. E változtatásokon felül a kiadványba bekerült még 13 oldalnyi, zömében prózai formában megírt, rövid aforizma gyűjtemény is (3. ábra).

Fejezetek	1826 (63 oldal)	1836 (115 oldal)
Bányászdalok (dallamhivatkozással)	19 db	21 db
Bányásköltemények (dallamhivatkozás nélkül)	5 db	8 db
Aforizmák	---	25+1 db
Szómagyarázat / Szócikk	32 db	55 db

3. ábra. A Klänge aus der Teufe 1826-os és '36-os kiadásának tartalmi összevetése

Amennyiben tehát a '26-os és '36-os kiadványokban szereplő lírai műveket együtt tekintjük át, akkor a 30 db költemény között az alábbi összetételt találjuk:

- ❑ **Bányászdalok:** 21 db, dallamhivatkozással ellátott, eleve éneklésre szánt mű;
- ❑ **Bányászballadák:** három db, drámai történetet elmesélő lírai költemény dallamhivatkozás nélkül;
- ❑ **Bányásköltemények:** hat db, verses formában íródott, de dallamhivatkozás nélküli mű.

A selmeci diákhagyományokkal kapcsolatos szakirodalomban jellemzően Stegmayer kiadványát tekintik az első nyomtatott diákdalgyűjteménynek, és kétségtelen, hogy jelenleg valóban nem ismerünk más, korábbi kiadású, hasonló tartalmú kötetet. Erre már az 1985-ben megjelent „A mi nótáink” c. átfogó tanulmányában [5] felhívta a figyelmünket Szemerey Tamás. A köztudatban elterjedt vélekedéssel el-

lentétben Stegmayer kiadványa azonban nem abban az értelemben diák- és/vagy bányászdalgyűjtemény, mint a későbbi selmeci kiadványok (pl. *Erinnerung an Schemnitz* – 1843 [6] és *Schemnitzer Akademische Lieder* – 1869, '70, '78, '98-as kiadásai [7–10]); ez ugyanis nem szerkesztői, hanem ún. szerzői dalgyűjtemény, ami azt jelenti, hogy az abban szereplő anyag nem más szerzők vagy más daloskönyvek darabjainak kiválogatásával állt össze, hanem a szerkesztő saját műveit tartalmazza, azaz a szerző és a szerkesztő személye is ugyanaz. Így tehát az itt szereplő szövegek is mind Stegmayer saját költői teljesítményét tükrözik, ő ugyanis nem lejegyezte és gyűjteménybe rendezte mindezeket a dalokat, hanem írta a szövegeket és azokat dallamra is ültette. Ezt támasztja alá az a tény, hogy a *Klänge aus der Teufe* oldalain megjelentetett alkotások az ott közölt szöveggel egyetlen korábbi kiadványban sem találhatók meg, márpedig az 1820-as évek derekára, az azt megelőző nagyjából 50 év során (kezdvé Johann Gottfried Herder 1778-as *Volkslieder*-ével [11], amelyet német nyelvterületeken az első, ilyen jellegű énekeket tartalmazó dalgyűjteménynek tartanak) azért már több tucat nép- és diákdal gyűjtemény is napvilágot látott.

Bár e szövegeknek kétségtelenül nem leljük nyomát az ezt megelőzően nyomdába került, hasonló tartalmú kiadványokban, ugyanakkor számos olyan szövegre lelhetünk korábról, amelyek ihletadó forrásul szolgáltak Stegmayer némelyik költeményéhez, s ugyanígy, az énekes művek esetében meghivatkozott dallamok is mind korábról ismert zeneművekben fedezhetők fel, ahogy ezekre egyébként ő maga is így utal. A szerzőséget illetően kétség mindössze 3–4 dalszöveg kapcsán merülhetne fel, amelyek bizonyos stílusjegyek alapján némileg kilógnak a sorból, mivel alig tartalmaznak költői újítást az eredeti művekhez képest, vagyis nagyon kevés benne a valódi költői teljesítmény, és így egyszerűségük okán inkább tűnnek egyfajta diákos átköltésnek, mintsem új lírai műnek. Ez azonban önmagában még egyáltalán nem zárja ki Stegmayer szerzőségét, csupán azt bizonyítja, hogy költőnk nem igazán erőltette meg magát versírás közben.

A kiadvány valójában nem diákdalgyűjtemény, abban az értelemben, hogy nem annyira diákdalokat tartalmaz, hanem sokkal inkább bányász nótákat. Művei legtöbbszörben ugyanis a megénekelt témák jóval erőteljesebben kapcsolódnak a bányászok mindennapi világához, mintsem a diákok tipikus akadémiai életéhez, még akkor is, ha joggal vethetjük fel, hogy a bányász-kohász képzés keretében tanuló diákság esetében azért nehezen szétválaszthatóak a bányászattal kapcsolatos utalások a diákéletre jellemző költői képektől.

A *Klänge aus der Teufe* c. kiadványban szereplő művek többségét ugyan nagy valószínűséggel az akadémiai időszak alatt szerezte Stegmayer, ám a kiadással mégis várt egészen 1826-ig, s csak végzését követően, Bécsbe visszatérve adta azt ki; bár például az *Abschied vom Liebchen* című dalszöveg már 1823. november 29-én is megjelent nyomtatásban egy bécsi folyóirat hasábjain [12]. És bár bizonyítani nyilván nem lehet, de jó okkal feltételezhető, hogy egyes jobban sikerült műveit már az akadémiai képzés ideje alatt megismertethette diáktársaival, akik így azokat első kézből átvéve énekelhették még azt megelőzően, hogy a nyomtatott gyűjteményes kiadvány megjelent volna.

Stegmayer bányászdalainak költői világa

Carl Stegmayer költészete a művek tartalmi szempontja alapján kétfelé bontható, azaz bányászdalokra és egyéb művekre, mivel az összegyűjtött és az életművét reprezentáló lírai művek alapján az látszik, hogy bányászattal kapcsolatos költemények csak a *Klänge aus der Teufe* lapjain jelentek meg és sem előtte, sem utána nem tért vissza e műnem keretében a témához. Bár a bányásatról írt még a későbbiekben könyveket és tanulmányokat is, ám azok nem lírai, hanem tisztán szakmai művek voltak. Arra vonatkozólag sajnos nincsenek fennmaradt utalások, hogy vajon miért nem jelent meg választott hivatásának témaköre az 1826/36 utáni költészetében? Talán a bányászattal kapcsolatos kezdeti ifjonti és romantikus lelkület idővel elhamvadt és a későbbi tapasztalatok, amelyeket már, mint gyakorló bányászati szakember szerzett felnyitották a szemét és elölték benne a bányászat iránti, kétségtelenül naiv rajongást és az azt megénekelő lírai hangot.

Mindettől függetlenül azért talán érdemes röviden áttekinteni, hogy e bányász-költemények (tehát dalok, balladák és egyéb versek) összességében milyen költői világot tükröznek, s ezeket a kétszáz évvel ezelőtti szerzeményeket miként érdemes napjainkban olvasni és értelmezni. (Helyhiány miatt most csak a bányász témájú szerzeményeivel foglalkozom a szerző teljes lírai életművének elemzése nélkül; azzal kapcsolatosan olvasható átfogóbb leírás a [2] írásban.)

Stegmayer bányász-költeményei kifejezetten hasonlóságokat mutatnak témaválasztásukban és egyértelműen kiviláglik a szerző elköteleződése is saját szakmája iránt, ami érthető is, hiszen egy húszas évei közepén járó fiatalember számára a bányászatban szerzett tapasztalatok (korábban a wielickai sóbányákban, illetve akadémistaként a Selmec környéki bányákban) olyan erőteljes benyomást jelenthettek, amelyek ilyen versek írására késztették. Ez a 30 darab verses formában írt költemény tehát – néhány kivételtől eltekintve – viszonylagos egységet mutat témáját és dalszerkesz-

tési elveit tekintve, ugyanis mindegyikükben érezhető a szakma iránti erős elköteleződés, amely ugyan némileg naiv, idealisztikus eszményképpel, néha népiessegre törekedve, vagy esetenként modorosan fennkölt stílusban énekli meg a bányászélet mindennapjait, ami sok tekintetben a német romantika lírikusainak műveiben érhető tetten hasonló formában. A dalszövegekről elmondható, hogy azok mindegyike valamilyen formában bányász témájú vagy legalábbis tartalmaz ilyen jellegű kifejezéseket és motívumokat; egyes dalkokban a bányásztéma végig dominál, megénekelve a földméli tevékenységek nehéz és veszélyes jellegét; míg más esetekben csupán a „Glück auf!” köszöntés, esetleg egy-egy elejtett szakkifejezés (pl. tárna, akna, fejtés) utal ilyesfajta kötődésre. A művekben a bányásztársadalom világát erőteljesen átszövő bajtársiasság, a bizalom és egymásrautaltság érzése, a munkavégzés során mindenütt jelenlévő veszélyekkel és nehézségekkel való folyamatos küzdelem, valamint a mindezek ellenére a bányászok lelkében meglévő örök reménykedés és a kudarcokkal, illetve a nyomorral szembeni büszke kiállás hangja jelenik meg.

A bányászat toposzaival párhuzamosan a költeményekben kidomborodik Stegmayer vallásossága is, valamint a bányásztársadalomnak az istenhittel és gondviseléssel kapcsolatos igen mély érzelmei. E művekben nehéz lenne különválasztani a költő személyes hitét a bányászéletre általában is jellemző mély, misztikus-vallásos tartalmaktól, hiszen Stegmayer vallásossága egyrészt saját neveltetéséből és lelki alkataból is fakad, másrészt viszont nyilvánvalóan a bányászati szakképzés során, a bányásztársadalom tagjaként megélt szokások és közösségi érzelmek is keverednek e szövegekben.

Mindezekén túlmenően, feltehetően nem járunk messze az igazságtól, ha feltesszük, hogy Stegmayer szeme előtt ott lebegett a nagy német romantikusok közül Novalis (eredeti nevén Friedrich Leopold von Hardenberg) és Theodor Körner példája is, akik bár hírnevüket irodalmi szépírói tevékenységüknek köszönhették, ám mindemellett kitanult és aktívan praktizáló bányamérnökök is voltak, akárcsak ő maga, akiknek ilyen téren szerzett személyes élményei szintén erőteljesen visszaköszönnek egyes műveikben. Ebben az értelemben akár azt is mondhatnánk, hogy Stegmayer egy megkésett romantikus költő volt; legalábbis a két említett szerzőhöz képest, akik a német korai romantika (Frühromantik) képviselői voltak és maradtak korai haláluk miatt; ő inkább a német romantika későbbi korszakaihoz sorolható (pl. Joseph von Eichendorff vagy Ludwig Uhland mellett).³

³ A bányászathoz kötődő líráját követő, későbbi költeményei jelentős részben már a bécsi biedermeierhez is kötik, bár a romantika harmadik nagy hullámának, a historiz-

Stegmayer „bányászromantikájában” visszaköszönnek az általános romantika jellemzői: a természet iránti rajongás és a természeti képek beemelése a lírába, s gyakran annak keveredése a misztikummal, illetve a középkori gyökerekre visszavezethető, mesékre és legendákra építő szimbolikával.

Mindez némileg szemben áll Stegmayer választott szakmájának akkori állapotával, hiszen addigra az ipari forradalom hatására jelentős átalakuláson ment át a bányászat-kohászat a XIX. század első évtizedeiben, mind a tudományos háttér, mind a technikai megvalósítás terén. A bányászatban már igen korán megjelentek azok a berendezések (pl. vízemelő szivattyúk), amelyek a földalatti munkavégzést segítették és egy gyors ütemű technikai modernizálódás ment végbe ekkor, amely jelentősen átalakította a bányászok évezredek óta kialakult tevékenységét. Ugyanakkor a bányásztársadalom alacsony iskolázottságú és jellemzően nehéz sorban tengődő tagjai saját gondolatvilágukkal, hagyományaikkal és babonáikkal nem tartottak lépést e fejlődéssel. Bár Stegmayer bányászattal kapcsolatos műveiben itt ott megjelennek e modern technikai vívmányok, ám költeményeiben mégis inkább a középkorból áthagyományozódott nehéz, kézzel végzett tevékenységek leírását találjuk és mindazt a szokásrendszert és generációkon át öröklődött hiedelemvilágot, amelyek e furcsa világ népségét jellemezték. Stegmayer költészete tehát részben megjeleníti ezt a kettősséget, vagyis, hogy a 19. sz. első felének bányászatát jellemző tudomány és technika már erőteljesen jelen volt az üzemek életében (pl. gőzgépek alkalmazása) és az akadémiát végzett bányatisztek is magukkal hozták a kor színvonalának megfelelő természettudományos ismereteket is, amelyeket a geológiai és kémiai munkák során fel is használtak. Ezekben az elméletekben (lásd például neptunizmus vs. vulkanizmus vita) már nem a középkori misztikus-vallási magyarázatok kaptak helyet; eltűntek az ártó szellemek és huncut manók, vagy az isteni beavatkozás kifürkészhetetlen és mindenható ereje. A bányászat-kohászat mint szakma a gazdaság alappillérvé vált, és a műszaki fejlesztések révén termelékenysége ugrásszerű növekedésnek indult, hogy kielégíthesse a rohamtempóban fejlődő gépipar alapanyag igényét. Ezzel párhuzamosan azonban a bányászszakma hierarchiájában alul helyet foglaló egyszerű kétkezi munkások továbbra is az évszázadok során kialakult misztikus helynek tekintették a bányák vágatait, ahol a természet veszélyei mellett ugyanúgy megannyi mitikus alak igyekezett az ember föld alatti munkáját megnehezíteni, s féltve őrizni a hegyek kincseit. A kor vándorjai még továbbra is a babonák és furcsa bányászszokások között élték

mussal átitatott romantikának a jegyei is feltűnnek egyes balladáiban.

mindennapjaikat, amelyek keveredtek a vallási hiedelmekkel és az istenbe vetett hittel. A bányák művelése és az üzemek gazdaságának szervezése robogott ugyan előre a technika nyújtotta lehetőségeket kihasználva, ám eközben az ott dolgozó emberek lelke még továbbra is csak az elmúlt korok sötét ösvényeit járta. És ahogy lelkiekben és ismereteikben sem gazdagodtak az egyszerű bányamunkások, úgy anyagi gyarapodásuk sem következett be az ipari forradalom időszaka alatt; a bányáüzemekben megtermelt nyereség egyértelműen a tulajdonos gyáriparosok vagyonát gyarapította, amiből nemigen részesültek a föld mélyének szorgos munkásai. Fenn a gazdagok csillogása és jóléte látszódott, míg lenn, a föld gyomrában végzett veszélyes és fárasztó munka mindennapi nyomora az éj sötétjében maradt. Stegmayer gyakorló bányatisztként testközelből láthatta ezt a kettősséget, s ezt a szakirodalmi munkássága keretében készült cikkekben, könyvekben részletesen elemezte és kritizálta is. Bár költészetében is erőteljesen megjelenik a bányászok világának megannyi kínja-problémája, de a versekben mindezt körbelengi egy megkésett romantikus máz, amelyet ellep még egy erős vallási érzület is, amelyben a földalatti munka nyomorúsága és maga a bányász is felmagasztalódik és hőssé válik. A bányász azzal vívja ki a Teremtő gondoskodását, hogy becsülettel tűri és elvégzi, mit rá kimért a sors, és csak azzal foglalkozik, hogy a föld gyomrának kincsét az emberség javáért a mélységből felhozza. Ezzel Stegmayer hétköznapi hősöket farag a szegény bányamunkásokból, akik tiszteletet és megbecsülést érdemelnek, s akiknek ő a maga részéről költeményeivel mindezt meg is adja. Ez a fajta ideálkép azonban nem kizárólag az ő sajátos világlátását tükrözi, mert ez szinte minden német nyelvű bányászdalban – akár népdal eredetű, akár a romantika költőinek ilyen tárgyú műveiről van szó – hasonlóképpen jelen van. Stegmayer tehát sem műfaji, sem tematikai szempontból nem tekinthetjük újító jellegű lírikusnak; nem, ő inkább tovább erősítette a bányászatról és bányászokról megszokott romantikus – és éppen emiatt a kívülállók számára sok tekintetben hamis elképzeléseket közvetítő – lírai képet és ebből egy egész csokorra valót faragott. Műveiben több műfajban is megteszi ezt, az egyszerű daloktól a balladáig és egyéb költeményekig; hol lírailag finoman kimunkált darabokban, hol csak egyszerű diákos átköltésekben. A bányászat témakörét sokszínűen, különféle eseményekhez kapcsolódóan mutatja be; megjelenik e művekben a földalatti munka, mint tevékenység maga, és megmutatkozik a bányász is saját lelki vívódásaival, bánatával és örömeivel; de találhatunk dalokat a bányásztemetések megilletődött pillanataihoz, mint ahogy a vidám italoztatás és egymás éltetése, illetve a barátság és összetartás ünneplése is beletartozik e körbe; de íródtak

versek a reggeli munkakezdéshez, mint ahogy a munka befejezéséhez is, vagy az újév megünneplésének szándékával, de akár a császár személyének szólóan is. Stegmayer bányász témájú költészete kapcsán a romantikus témák és szimbólumok alkalmazása kifejezetten tetten érhető bányászballedáiban, amelyekben varázslatos-tragikus történetek keretei között misztikus alakok (pl. bányarémmé, lidércek vagy a halott anya szelleme) lépnek színre. E balladák és a bányászdalok többségének esetében is megbúvik mindezek hátterében valamiféle homályos, melankolikus életérzés, amelyben a veszélyekkel teli bányászszakma alapvető sajátosságát, a mindig jelenlévő félelmet és izzasztó, gyakran véres és végzetes küzdelmeket, illetve az általuk keltett testi-lelki fájdalmakat jeleníti meg művészi eszközökkel a szerző. Ugyanakkor mindezeket ellenpontozva, szinte minden műben megtalálható a bányászlét szépségének költői említése is, akár a bányászokat kísérő jó szerencse tekintetében, akár a föld rejtékének vágyott kincsei vagy a természet egyszerre zord és mégis kies szépségének formájában. És természetesen gyakran felcsendül a „Glück auf!” köszöntés is. A gyűjtemény címében szereplő „Tiefe” (mélység) így tehát nem csupán a fizikailag megtapasztalható sötét, földalatti világra utal, hanem szimbólumként a bányamunkások belső, lelki mélységeit is felszínre hozza és átélhetővé teszi mindannyiunk számára.

Stegmayer műveinek egy jó részét nemcsak irodalmi, hanem zenei értelemben is dalok, azaz dallammal énekelhető szövegek teszik ki, ami azt jelenti, hogy e költeményekhez találni vagy szereznünk kellett megfelelő dallamokat. Mivel Stegmayer sokoldalúsága ellenére nem volt zeneszerzői vénával megáldva vagy legalábbis ennek nem adta nyomát, így elsősorban „hozott anyagból dolgozott”, azaz már meglévő zenei művek dallamait illesztette saját szövegeihez. De némely bányászdal esetében, a megszülető költemény nemcsak a zenei anyagot veszi át, hanem „plagizál” az ihletadó, eredetileg is a dallamoz fűződő szövegekből. Ennek egyik nyilvánvaló oka, hogy így egyszerűbb az új költemény struktúráját (pl. rímképletek, szövegritmika) a dallamhoz igazítani. Ékes példája ennek a *Was ist des Bergmanns Vaterland* című átköltése is, ahol – hasonlóan még pár másik átirathoz – a szövegekben egyes sorokat szinte szó szerint vett át Stegmayer, vagy esetenként a rímalkotó szavakat hagyta meg a sorok végén. Az ilyen módon „készült” bányászdalok ekképpen sokkal inkább tekinthetők diákos átköltéseknek, mintsem komoly lírikusi teljesítménynek. Bár a költői színvonal megítélése természetesen ízlés kérdése is, de a dalokból az mindenestre kiviláglik, hogy Stegmayer – noha általában tisztességes lírikusi munkát végez – de mégsem kezel olyan bravúrosan a nyelvet, mint példaképei; szóképlete kissé egysíkú; vannak tipikusan visszatérő

elemei, szófordulatai, amelyekkel érezhetően pátoszt, emelkedettséget kíván felidézni az olvasóban, ám ennek ellenére e mondatok néha mégiscsak üresen, laposan csengenek az adott szövegben. Mert hát nem elvitatva, hogy a dalgyűjteményben vannak kifejezetten jól sikerült darabok is a szövegek között, de bizony szerepelnek abban kevésbé műves költemények is.

A dalok dallammal énekelt művek, ezért pár szót érdemes ezek zenei anyagának is szentelni. Az egyes szerzeményekhez adott instrukciók révén Stegmayer egyértelművé teszi, hogy bányászdalainak dallamát nem ő maga szerezte, hanem szinte kivétel nélkül korábban keletkezett, és a XIX. század elején közismert és kedvelt dallamokra ültette rá saját műveit, pontosabban eleve az adott dallamhoz írta a bányász témájú dalszöveget (vagy csak módosította az eredetit), s nem kifejezetten az adott vershez komponált saját zenei anyagot. Ez a módszer teljesen általános volt a XIX. század elejének diákdal-költészetében, így méltánytalan lenne emiatt plagizálással vádolni Stegmayert.

Ha részletesen áttekintjük a költeményekhez felhasznált zenei motívumokat, akkor látható, hogy ezek között találunk négy népdalt, amelyek keletkezési dátuma és szerzősége természetesen nem ismert, de írott feljegyzések alapján a XVIII. sz. előtti időkből származnak; találunk továbbá 4 dallamot, amelyek a XVIII. század előtt keletkeztek (köztük Carl Philipp Emanuel Bach és Luther Márton darabjai); ám az összes többi költemény zenei forrása mind a XVIII–XIX. század fordulójára körüli évtizedekben, konkrétan 1793 és 1825 között íródott. E zeneszerzők között megtaláljuk – a teljesség igénye nélkül – Gustav Reichardt, Hans Georg Nägeli, Franz Schubert, Franz Joseph Haydn és Carl Maria von Weber nevét is. (Ez utóbbi minden bizonnyal közel állhatott költőnk szívéhez, hiszen három zenei darabot is kölcsönzött tőle.) Ez a kb. három évtizednyi zenei termés tehát zömében még egészen friss volt akkor, amikor azokat Stegmayer kiválasztotta saját költeményeihez, nyilván azért pont ezeket, mert német-osztrák zeneszerzők művei voltak és ismertek, kedveltek lehettek a maguk idején, s jól illettek saját szerzeményeihez, illetve többségében egyszerű dallamvezetésük miatt fülbemászó, könnyen énekelhető művek (ma úgy mondanánk, hogy slágerek) voltak, amelyek révén így diáktársai is könnyen megtanulhatták az új szövegeket ezzel segítve azok elterjedését. Stegmayer bányászdalainak egy jelentős része tehát nem teljes mértékben eredeti alkotás, hanem inkább csak átköltés és diákdal célú felhasználás; költészete nem hozott újdonságot a rétegműfaj irodalmába, az nem reformálta meg az ezzel kapcsolatos sztereotípiákat, hanem inkább erősítette a romantika által kialakított misztikus és jelentősen idealizált szakmai kép lírai bemutatását.

Mindazonáltal egy-egy diákdal értékét, vagy akár egy diákdalgyűjtemény egészének jelentőségét sosem a benne szereplő művek művészi-esztétikai minősége határozza meg, hiszen abban a legnagyobb költők és zeneszerzők művei mellett a kevésbé jegyzett vagy akár ismeretlen szerzők darabjai is helyet kaptak és névértéküktől függetlenül tehettek szert közkedveltségre a diákság körében. S ha így tekintünk Stegmayer szerzeményeire, akkor azokat sem feltétlen irodalmi színvonaluk alapján kell megítélnünk, hanem a diákdalkultúrára és a bányászdalagyományra gyakorolt hatása szempontjából.

Így visszatekintve azonban elmondható, hogy ez a romantikus szemlélet tovább hagyományozódott azon dalok által, amelyek így vagy úgy, de bekerültek a diákdalkultúrába és/vagy a szakmai közösségek nótái közé; habár ebből mindösszesen csupán 11 mű öröklődött tovább a későbbi generációk számára mind a német-osztrák, mind a selmeci kiadványokban; a többi sajnos elfelejtődött. A XX. századi selmeci dalagyományban pedig még rosszabb a helyzet, ugyanis csak egyetlen dala élte túl a magyarosítási törekvéseket és a kényszerű költözést Selmecről Sopronba. Habár 1912-ben Révai Károly jóvoltából a 11-ből hét dalnak megszületett a magyar fordítása [13], mégis csupán a „Halld a torony harangja bűg...” kezdetű nótánk maradt ismert és énekelt az utódkarokon és a szakmabeliek között, és ez az egyetlen, amely szinte végig része volt a kiadott dalgyűjteményeknek is.

Irodalom

- [1] Stegmayer, Carl: Klänge aus der Teufe. Gedruckt von Leopold Grund, Wien, 1826.
- [2] Pálkás Róbert Gusztáv: Hangok a mélyből – Carl Stegmayer bányászdalai és válogatott költeményei. Dunaújváros, 2026.
- [3] https://www.biographien.ac.at/oeb1/oeb1_S/Stegmayer_Karl_1800_1862.xml
- [4] Stegmayer, Carl: Klänge aus der Teufe. Verlag von Franz Tendler, Wien, 1836.
- [5] Szemerey Tamás: A mi nótáink története. Miskolc, 1985.
- [6] Erinnerung an Schemnitz. Verlag von J. Bernhard Sprader, Schemnitz, 1843.
- [7] Schemnitzer Akademische Lieder. Verlag der Schulze'sche Buchhandlung, Celle, 1869.
- [8] Schemnitzer Akademische Lieder. Verlag der Schulze'sche Buchhandlung, Celle, 1870.
- [9] Schemnitzer Akademische Lieder. Literarische Anstalt August Schulze, Celle und Leipzig, 1878.
- [10] Schemnitzer Akademische Lieder. Literarische Anstalt August Schulze, Celle und Leipzig, 1898.
- [11] Herder, Johann Gottfried Herder: Volkslieder. Weygandschen Buchhandlung, Leipzig, 1778.
- [12] Wiener Zeitschrift für Kunst, Literatur, Theater und Mode. Wien, 29 November 1823.
- [13] Révai Károly (ford.): Selmeczi bursch dalok. Nagybánya, 1912.

Szerzői életrajzok

BOROS ÁKOS geológus, földtudományi mérnök és térinformatikus, több mint 15 éves szakmai tapasztalattal a földtudományok különböző területein. Munkája során földtani és térbeli adatok feldolgozásával, integrálásával, értelmezésével és modellezésével foglalkozik. Szakmai érdeklődésének középpontjában a különböző forrásból és tudományterületekről származó adatok együttes értékelése és gyakorlati hasznosítása áll. Az utóbbi években kiemelten foglalkozik a digitális adatfeldolgozás, az automatizálás és a mesterséges intelligencia földtudományi alkalmazási lehetőségeivel. Az Mhyner Geoconsulting Kft. társalapítójaként kutatási és ipari projektekben egyaránt részt vesz.

FEHÉR GERGŐ okleveles bányamérnök, a MOL Csoporthoz tartozó Metal Waste Solution Kft. laboratóriumvezetője. Felsőfokú tanulmányait a Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Karán végezte: először környezetmérnöki diplomát szerzett hulladékgazdálkodási szakirányon, majd ezt követően okleveles bányamérnökként végzett nyersanyag-előkészítés specializációval. Fő szakterülete a komplex összetételű másodlagos nyersanyagok, ezen belül is kiemelten a különféle elektronikai hulladékok fizikai-mechanikai előkészítése és a reprezentatív ipari mintavételezés. Széles körű gyakorlati tapasztalattal rendelkezik a bonyolult mátrixú anyagok analitikai célú előkészítésében, beleértve a speciális savas és lúgos, valamint a pirometallurgiai feltárási eljárásokat. A laboratóriumi és minőségellenőrzési folyamatok irányítójaként kiterjedt műszeres és klasszikus analitikai szakértelemmel bír. Szakmai kompetenciái közé tartozik a láng-atomszorpciós spektrometria és az energiadiszperzív röntgenfluoreszcens spektrometria rutinszerű alkalmazása, valamint a klasszikus potenciometriás és komplexometriás titrálási módszerek magas szintű integrálása a napi értékmeghatározási folyamatokba. A Metal Waste Solution Kft. szakmai csapatának meghatározó tagjaként aktív szerepet tölt be a vállalat innovatív technológiáinak kidolgozásában.

DR. HEGEDÜS BALÁZS a Miskolci Egyetem Fémelőállítási és Öntészeti Intézetének tudományos munkatársa. Szakmai és kutatási tevékenysége az extraktív metallurgiára, a másodlagos nyersanyagok és ipari melléktermékek értéknövelő hasznosítására, valamint a magas hőmérsékletű termokémiai folyamatokra terjed ki. Anyagmérnök diplomáját (fémelőállítási és öntészeti szakirányon) 2017-ben, okleveles kohómérnöki (MSc) diplomáját energetikai specializáción 2020-ban, doktori (PhD) fokozatát pedig 2026-ban szerezte meg a Miskolci Egyetem Anyag- és Vegyészmérnöki Karán. Szakmai tapasztalatait egyetemi K+F és kutatási projektekben alapozta meg, melyek között fémelőállítás, műanyag-hulladék-hasznosítás és levegőminőségi mérőrendszer tervezése és kiépítése is szerepelt. Eredményeit pedig nemzetközi szakfolyóiratokban megjelent közlemények és bejegyzett ipari szabadalom is fémjelzi.

ILLÉS ISTVÁN BALÁZS okleveles kohómérnök, a MOL Csoporthoz tartozó Metal Waste Solution Kft. technológia- és anyagvizsgálati területének vezetője. Anyag- és kohómérnöki diplomáit a Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Karán szerezte, ahol jelenleg PhD doktori fokozatszerzési eljárása zajlik. Fő szakterülete az extraktív metallurgia, a fémek kinyerő és rafináló elektrolízise, valamint a fémtartalmú hulladékok újrahasznosítása. Kiterjedt tapasztalattal bír a termodinamikai modellezés, a hidrometallurgiai eljárások, a fémoldatok tisztítása és a salakrendszerek optimalizálása terén. Kutatásai során alumíniumhulladékok és salakok olvasztásának fejlesztésével, horganytartalmú páclevek hasznosításával, valamint elektronikai hulladékok kritikus fémjeinek kinyerésével foglalkozott. Kiemelt területe a Li-ion akkumulátorok feldolgozása, ahol az értékes fémek (Li, Co, Ni, Mn) visszanyerését célzó innovatív hidro- és elektrometallurgiai technológiákkal foglalkozik. Az utóbbi években az elektronikai hulladékok nemesfémtartalmának visszanyerési és finomítási eljárásaival foglalkozik. Jelenlegi tevékenységének fókusza az ehhez kapcsolódó értékmeghatározási és analitikai eljárások fejlesztése, valamint a laboratórium (ISO/IEC 17025) akkreditációjának megszerzése. Vezetői tevékenysége mellett aktív szerepet vállal a szakmai utánpótlás nevelésében: irányítja a kollégák belső képzését, továbbá témavezetőként és mentorként támogatja a szakdolgozatok, diplomamunkák készítését, illetve a duális képzésben részt vevő hallgatók munkáját.

DR. KONCZ-HORVÁTH DÁNIEL a Miskolci Egyetem Fémtechnológiai, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetének tudományos főmunkatársa. Szakterülete az anyagvizsgálat, ezen belül kiemelten a pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok, főbb érdeklődési területe a felületkezelési eljárások témája. Kohómérnöki diplomáját 2006-ban, doktori (PhD) fokozatát pedig 2014-ben szerezte a Miskolci Egyetem Anyag- és Vegyészmérnöki Karán, emellett 2011-ben mérnök-közgazdász oklevelet szerzett az egyetem Gazdaságtudományi Karán. Szakmai háttérét neves piaci szereplőknél alapozta meg: korábban a General Electric Hungary ösztöndíjas gyakornokaként, majd a Robert Bosch Elektronika Kft.-nél doktoranduszként és gyakornokként szerzett ipari környezetben tapasztalatot.

ID. ŐSZ ÁRPÁD aranyokleveles olajmérnök, menedzser szakmérnök. 1969-ben szerzett olajmérnöki diplomát Miskolcon, a Nehézipari Műszaki Egyetem Bányamérnöki Karán, majd 1993-ban menedzser szakmérnöki diplomát a Veszprémi Egyetemen. 1969-től 2015-ben történt nyugdíjazásáig – 46 éven keresztül – a kőolaj- és földgázbányászat területén fűrészi-, lyukbefejezési- és kútjavítási tevékenységgel, azok tervezésével, irányításával és ellenőrzésével foglalkozott a Kőolajkutató Vállalatnál és a MOL Nyrt.-nél. Dolgozott az Egyesült Arab Emírátsokban (Abu Dhabi) és Irakban (Kurdisztán). Az OMBKE tiszteleti tagja és a MMK aranygyűrűs mérnöke.

PÁLINKÁS RÓBERT GUSZTÁV okleveles kohómérnök, mérnök közgazdász és Európai Unió szakértő. A Dunaújvárosi Főiskolán (1995) és a Miskolci Egyetem Kohómérnöki Karán (1997) szerzett kohómérnöki oklevelet, majd PhD-képzésben vett részt, bár doktori minősítést nem szerzett; az ezt követő években levelező szakokon közgazdasági végzettséggel bővítette tudását. Pályafutását 2000-ben a Dunafer Acélművek Kft.-nél kezdte, majd ezt követően jellemzően a fémipar területén (öntészet, forgácsolás, képlékenyalakítás) működő nemzetközi autópári beszállító vállalatoknál dolgozott műszaki és minőségügyi vezetői pozíciókban, valamint folyamatfejlesztési tanácsadóként, ill. később egy légiipari beszállítótól ügyvezetőként. Főiskolás éveitől kezdve foglalkozik a selmeci diákszakadások, s ezen belül elsősorban a dalhagyomány kutatásával; jelentek meg tanulmányai annak történetével kapcsolatban, ill. több diákdalgyűjteményt is szerkesztett az elmúlt 30 évben, köztük számos elfeledett német diáknóta fordításával és megzenésítésével.

PROF. DR. TÖRÖK TAMÁS ISTVÁN okleveles kohómérnök, az MTA doktora, a Miskolci Egyetem Fémelőállítási és Öntészeti Intézetének professor emeritusa. Szakmai és kutatási tevékenysége a fémkohászati technológiáktól a kémiai metallurgián át a felülettechnológiákig és a nanotudományokig terjed. Kiemelt szakterületei a korróziós folyamatok és a korrózióvédelem, a fémötvözetek felületkezelése, a felületmódosítás és a bevonatképzés. Okleveles kohómérnöki diplomáját 1974-ben szerezte a Miskolci Egyetemen. Oktatói és kutatói pályafutása során jelentős szerepet vállalt a kémiai metallurgiai és felülettechnikai szakterület egyetemi oktatásának és kutatásának kialakításában. Számos, felületkezeléssel és bevonattechnológiákkal foglalkozó tantárgy kidolgozója és oktatója. A Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola tisztagja, valamint a Magyar Korróziós Szövetség főtitkára.

FÉMALK



A FÉMALK ZRT. MÁR
TÖBB MINT HARMINC ÉVE
MEGHATÁROZÓ SZEREPLŐJE
AZ AUTÓIPARNAK.

CSATLAKOZZ
CSAPATUNKHOZ!

WWW.FEMALK.HU/KARRIER