

## A természetes hidrogén mint potenciális jövőbeli energiaforrás földtani háttere és kutatásának lehetőségei

BÉKÉSI Észter<sup>1,2</sup>, TARI Gábor<sup>3</sup>, BERKESI Márta<sup>1,2</sup>, GELENCSÉR Orsolya<sup>4</sup>, HORVÁTH Laura<sup>5</sup>, KOVÁCS Gábor<sup>6,7</sup>,  
MAYER Zoltán<sup>8</sup>, PORKOLÁB Kristóf<sup>1,2</sup>, SPRÁNITZ Tamás<sup>1,2</sup>, SZÁRNYA Csilla<sup>1</sup>, SZTANÓ Orsolya<sup>9</sup>

<sup>1</sup>HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, Sopron. E-mail: bekesi.eszter@epss.hun-ren.hu

<sup>2</sup>MTA–HUN-REN FI FluidsByDepth Lendület Kutatócsoport, HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, Sopron; <sup>3</sup>OMV Energy, Vienna, Austria; <sup>4</sup>University of Texas, Austin, Bureau of Economic Geology, USA; <sup>5</sup>Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Kőzettani és Geokémiai Tanszék, Litoszféra Fluidum Kutató Laboratórium, Budapest; <sup>6</sup>Geometa Kft., Budapest;

<sup>7</sup>Eötvös Loránd Tudományegyetem, Savaria Egyetemi Központ, Földrajzi Tanszék, Szombathely; <sup>8</sup>Magyar Hidrogén és Tüzelőanyag-cella Egyesület, Budapest; <sup>9</sup>Eötvös Loránd Tudományegyetem, Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, Budapest

### *Geological characteristics and exploration methods of natural hydrogen*

#### Abstract

Natural hydrogen ( $H_2$ , occurring naturally in the subsurface) is receiving increasing global attention as a potential energy source, although future exploitation requires the more complete understanding of hydrogen systems. Methodologies used in hydrocarbon exploration can be partly adopted to hydrogen systems, while hydrogen is expected to behave differently in the subsurface. The two most important hydrogen generating mechanisms are water-rock interactions (mainly serpentinization) and radiolysis (the breakdown of water by radioactive elements). Due to its high mobility, potential hydrogen fields are likely to be short-lived, dynamic systems, and the accumulation may only be provided by effective seals, such as evaporites. However, it is important to note that globally there is only one known natural hydrogen field discovered, the Bourakébougou field in Mali. In relation to its mobile nature, surface manifestations of hydrogen, such as mega-seeps, so-called fairy circles (sub-circular depressions), and micro-seepages associated with fault zones exist. Geophysical and geological methods used in the hydrocarbon industry can be partially applied to hydrogen exploration, but new tools are necessary to infer for the presence of hydrogen in the subsurface. Remote sensing methods are effective tools for mapping potential hydrogen seepages, primarily fairy circles. Soil gas measurements are widely accepted methods to identify hydrogen seeps and are under rapid methodological development. The presence/absence of other gases ( $CO_2$ , Rn, He,  $CH_4$ ,  $N_2$ ) and direct analyses of fluids trapped as inclusions in rock samples can provide important additional proxies for hydrogen. The integration of observation- and model-based studies promote the better understanding of hydrogen systems, while further research is necessary for potential resource characterization and market utilization.

*Keywords: natural hydrogen, hydrocarbon systems, fairy circles, remote sensing, soil gas measurements, geochemistry*

#### Összefoglalás

A természetes (a felszín alatt természetesen előforduló) hidrogén ( $H_2$ ) mint energiaforrás egyre növekvő érdeklődést kap a globális energiaszektorban, azonban a kiaknázásához a hidrogénrendszerek szélesebb körű megértése szükséges. A szénhidrogén-kutatásban használt módszerek részben alkalmazhatók a hidrogénrendszerekre, azonban a hidrogén számos aspektusban eltérően viselkedik. A hidrogén alapvetően kétféle mechanizmussal, víz-kőzet kölcsönhatással (legfontosabb folyamat a szerpentinizáció) és radiolízissel (vízbontás radioaktív elemek segítségével) keletkezhet. A hidrogén-gáz jelentős reakcióképessége és mobilitása miatt a potenciális hidrogénmezők valószínűsíthetően rövid élettartalmú, dinamikus rendszerek, és a csapdázódást hatékony zárókőzet biztosíthatja (pl. evaporitok), azonban fontos hangsúlyozni, hogy bizonyított hidrogén mezőt a mali Bourakébougou-mezőn kívül még nem tártak fel. A hidrogénmolekulák mozgékonyságának köszönhetően a természetes hidrogénnek számos felszíni megjelenési formája ismert, amely a felszín alatti hidrogénképződés indikációja lehet. Ilyenek a hidrogén megaszivárgások, az ún. tündérkörök (kerekded alakú, felszíni mélyedések), illetve kisebb, törésrendszerekhez kapcsolódó szivárgások. A hidrogén kutatására a szénhidrogéniparból ismert geofizikai-geológiai fókuszú módszerek – megfelelő módosítással – részben alkalmazhatók, a hidrogén sajátosságai miatt azonban új eszköztár is szükséges. A potenciális felszíni hidrogéniszivárgások, elsősorban a tündérkörök kutatásának hatékony eszközei a műholdalapú távérzékelési módszerek. A szivárgások helyi azonosítására a talajgáz geokémiai mérésekkel történik, melynek módszertana és eszköztára dinamikusan fejlődik napjainkban. Fontos kiegészítő információt adhatnak a hidrogén potenciális jelenlétéről vagy eredetéről az egyéb gázokra ( $CO_2$ , Rn, He,  $CH_4$ ,  $N_2$ ) irányuló mérések, illetve a kőzetekben zárványok formájában csapdázódott fluidumok direkt vizsgálata. A különböző meg-

figyelés- és modellalapú kutatások integrálása, együttes értelmezése lehetőséget ad a hidrogén rendszerek tulajdonságainak és viselkedésének megismerésére. A dinamikusan fejlődő kutatások ellenére azonban a természetes hidrogénrendszerek teljes körű megértése, ami elengedhetetlen lenne a kitermelés lehetőségeinek és feltételeinek feltérképezéséhez és a piaci hasznosítás megalapozásához, még várat magára.

*Tárgyszavak: természetes hidrogén, szénhidrogénrendszerek, tünderkörök, távérzékelés, talajgázösszetétel-mérések, geokémia*

## Bevezetés

A természetes (fehér, arany vagy geológiai) hidrogén a felszín alatt természetesen előforduló hidrogéngázt jelenti, amely a Föld mélyén található kőzetekből származik, ott vándorol és tárolódik, hasonlóan a szénhidrogénkészletekhez. A felszín alatt természetes eredetű gázok között a hidrogéngáz mobilitása, reakcióképessége jelentős, amiből logikusan következtetve sokáig úgy gondolták, hogy nagy mennyiségű hidrogéngáz-felhalmozódások nem jöhetnek létre. Ezt a nézőpontot támogatta a szénhidrogénfúrásokból származó tudásunk is, hiszen a döntően üledékes medencékben fúrt kutakban többnyire nem találtak jelentős hidrogéngáz-koncentrációkat. Az utóbbi évtizedekben a hidrogéngáz-felhalmozódások létezéséről alkotott kép jelentősen megváltozott, elsősorban a Bourakébougou-hidrogénmező (Mali) 1987-es felfedezésével, ahol véletlenszerűen, víz után kutatva szinte tiszta (98%) hidrogéngázt találtak, amit gázrobbanás kísért (PRINZHOFER et al. 2018). A felfedezést követően a fúrást lezárták, majd 2011-ben a Petroma olajcég kutatási engedélyt szerzett a területre, és a Bougou-1 fúrásban megkezdte a hidrogéntermelés tesztelését. Ezt követően, 2017-től ~30 kutatófúrást mélyítettek, amelyek jelentős hidrogéngáz-tárolókat tártak fel. A Bourakébougou-hidrogénmező példájának hatására a Föld különböző területein indultak kutatások a potenciálisan kitermelhető hidrogénfelhalmozódások feltérképezésére. Európában például Franciaország szénbányászat által érintett, ÉK-i területén (Lotaringia) mélyült kutatófúrásokban számottevő hidrogénkoncentrációkat mértek (~1200 m mélységben), és a pozitív hidrogénindikációk és potenciálbecslések alapján (DERONZIER & GIROUSE 2020) 2025 decemberében új fúrások indultak a mélyebben (~3 km) található hidrogén kutatására.

A természetes hidrogén mint karbonsemleges energiaforrás iránt egyre nagyobb az érdeklődés az energiaszektorban (RIGOLLET & PRINZHOFER 2022), hiszen olcsóbb és hatékonyabb alternatívát jelenthet a jelenleg használt fekete, szürke, kék, rózsaszín és zöld hidrogénhez képest (1. ábra), amelyek előállítására – a zöld hidrogén kivételével – jelentős karbonlábnyommal rendelkeznek. A szakirodalom számon tartja a narancs hidrogént is, amely a hidrogén természetes képződési reakciójára épül, azonban a természetben lejátszódó folyamatokat mérnöki/ipari módszerekkel segíti elő, pl. CO<sub>2</sub>-besajtolással és/vagy kőzetrepesztéssel növelve a reaktív felületet a kőzet-víz kölcsönhatás elősegítéséhez (OSSELIN et al. 2022) (1. ábra). A természetes és a stimulált hidrogén közötti alapvető különbségek (természetesen előforduló/mesterségesen kialakított hidrogénrendszerek), valamint az eltérő technológiák és szabályozási lehetőségek

miatt a jelen tanulmányban a természetes hidrogénre koncentrálnak.

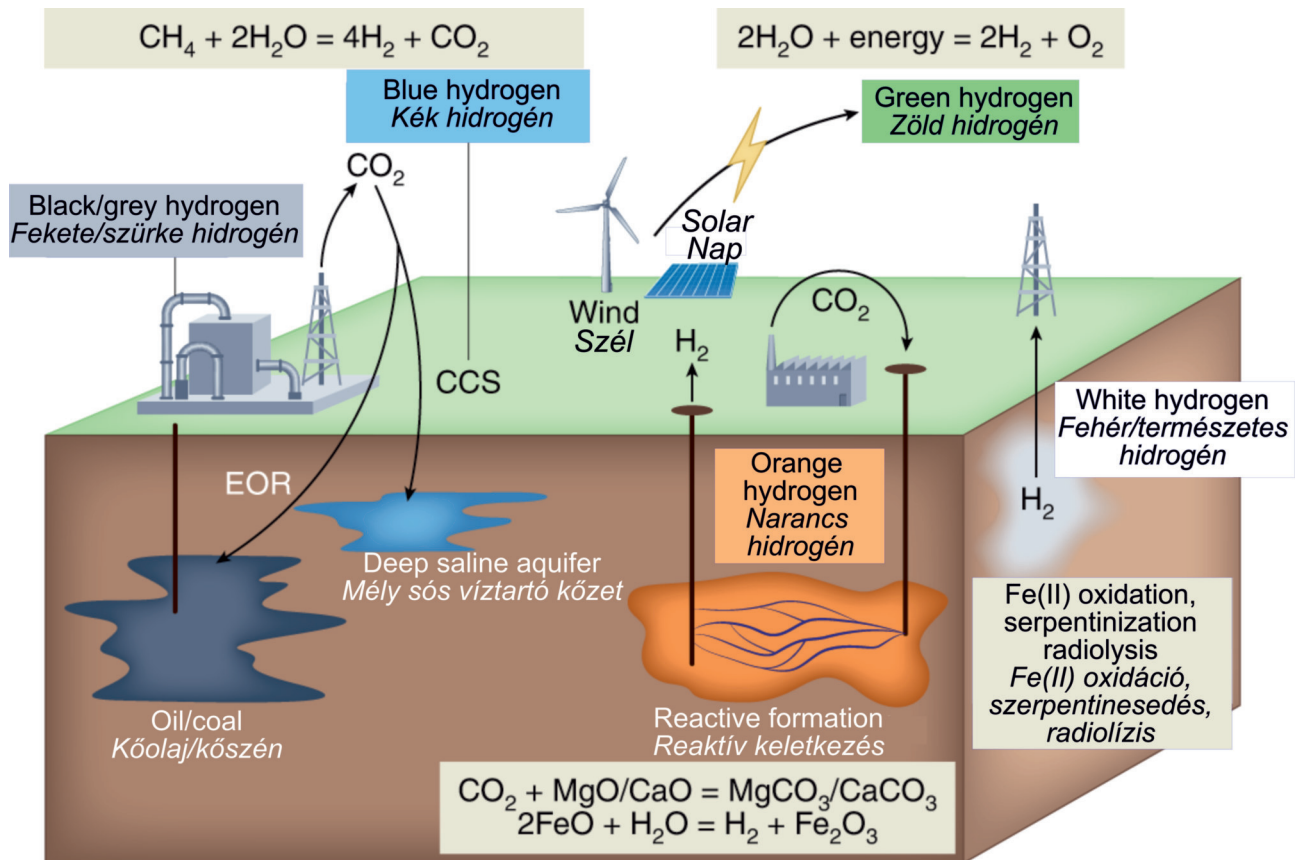
A természetes hidrogén körül továbbra is rengeteg tudományos kérdés merül fel. A keletkezési, migrációs és felhalmozódási folyamatait még nem teljesen értjük, valamint a hidrogén kutatásának eszközei és tapasztalatai hiányosak, így fejlesztésre szorulnak. A természetes hidrogénrendszerek bizonyos aspektusokban hasonlóak a szénhidrogénrendszerekhez, így a szénhidrogéniparból ismert kutatási módszertan részben alkalmazható a hidrogén kutatására (TARI 2025), azonban a természetes hidrogénforrások potenciális kiaknázásához elengedhetetlen a természetes hidrogénrendszerek szélesebb körű megértése és további kutatási eszközök, módszertanok fejlesztése.

A US Geological Survey legújabb tanulmánya szerint a földkéregben több millió megatonna természetes hidrogén halmozódhatott fel (ELLIS & GELMAN 2024). Ez a becslés azonban nagyfokú bizonytalansággal jár, hiszen a hidrogénfelhalmozódások lehetséges mérete és eloszlása nem ismert. A hidrogén nagy része valószínűleg olyan mélyen, olyan messze a parttól (offshore lelőhelyek) vagy olyan kis mennyiségben található, hogy gazdaságosan nem lehet kitermelni. Ugyanakkor a becsült felszín alatti hidrogén mennyiségének még egy kis része is több száz évre kielégíthetné a globális keresletet. A USGS a globális potenciálbecslés mellett az Egyesült Államok természetes hidrogénpotenciáljának felmérésére is készített egy részletes tanulmányt (GELMAN et al. 2025); mindkét tanulmány hangsúlyozza, hogy a valós mennyiségek meghatározásához kulcsfontosságú a hidrogénfelhalmozódásokhoz kapcsolódó geológiai folyamatok teljesebb körű megértése.

A jelen tanulmány célja, hogy átfogó képet adjon a természetes hidrogénről a hazai szakmai közösség számára. A szemle nagy mértékben épít egy angol nyelvű könyvfejezetre (TARI 2025), amely a természetes hidrogénrendszereket a szénhidrogénrendszerekhez hasonlóan írja le. A természetes hidrogén földtani vonatkozásaihoz és kutatási módszereihez kapcsolódó további szempontok részletes szakirodalmi áttekintés alapján kerülnek bemutatásra.

## A természetes hidrogénrendszerek jellemzői, valamint hasonlóságok és különbségek a szénhidrogénrendszerekkel

A legfontosabb hidrogéntermelő folyamatok közé tartoznak a víz-kőzet kölcsönhatások, különösképp a serpentinisedés, melynek során a víz redukált vas (ferro) ionban (Fe<sup>2+</sup>) gazdag ásványokkal reagál, aminek eredményeként



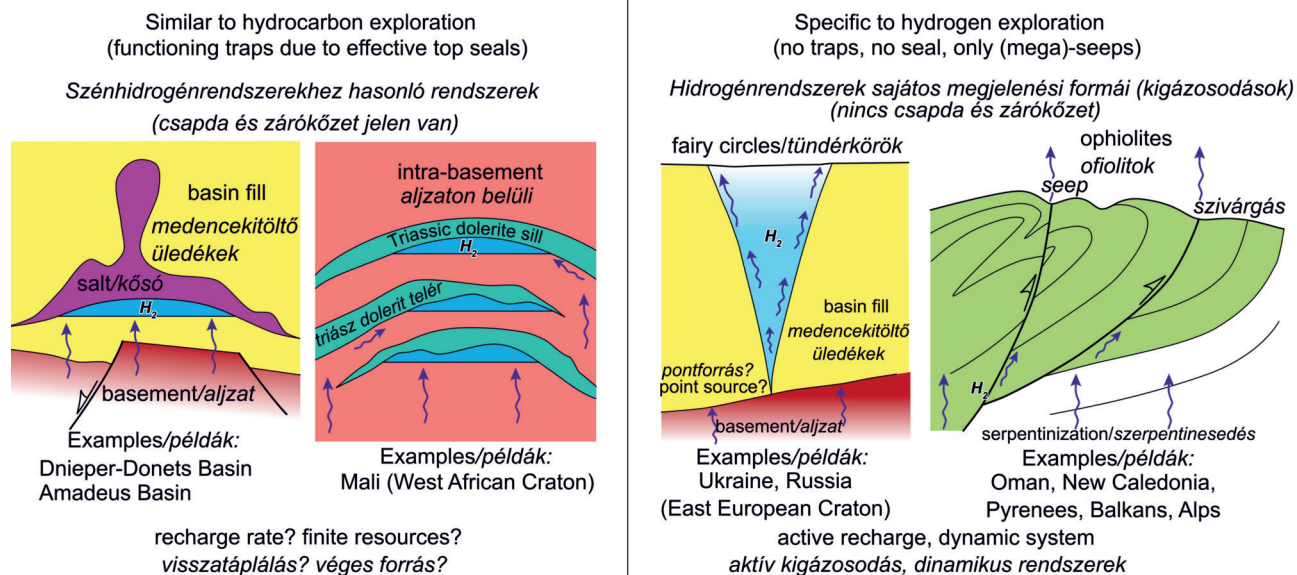
I. ábra. A hidrogéngáz előállításának és előfordulásának módjai (OSSELIN et al. 2022)

Figure 1. The different colours of hydrogen (after OSSELIN et al. 2022)

molekuláris hidrogén szabadul fel ( $2\text{FeO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2$ ). A szerpentinésedéshez kötődő hidrogéntermelés magasabb hőmérsékleten (200–300 °C) a leghatékonyabb, és elsősorban köpenyeredetű ultramafikus kőzetekhez, pl. kontinensre tolódtott óceáni kőzetlemezszeletekhez, úgynevezett ofiolitsorozatokhoz köthető. A másik fontos hidrogéntermelő folyamat a radiolízis, melynek során archaikumi-proterozoikumi kontinensmagokat és ősmasszívumokat alkotó kőzetekben lévő radioaktív elemek (U, Th, K) ionizáló sugárzása bontja a kőzetben cirkuláló, felszín alatti vizet. A szénhidrogénfúrások csak ritka esetekben érik el ezeket a hidrogéntermeléshez kapcsolódó kőzeteket, mivel a szénhidrogének elsősorban az ezek felett elhelyezkedő üledékes medencékben fordulnak elő, így kevés információval szolgálnak a potenciális hidrogénfelhalmozódásokról, rámutatva a további, hidrogénfókuszú kutatások szükségességére. Fontos megemlíteni, hogy az üledékes kőzetek – elsősorban az agyagásványban gazdag kőzetek, valamint a kőszén – is lehetnek potenciális hidrogénforrások, azonban a hidrogén felszabadulása a szénhidrogénekhez képest sokkal magasabb hőmérsékleten, így az üledékes kőzetek tipikus helyzeténél mélyebben zajlik.

A felszín alatti közegben a hidrogéngáz fluidumokban való oldhatósága nagymértékben mélységfüggő. A hidrogén többnyire más gázokkal keveredve, tiszta gázfázisban szállítódik a forrásközettől a sekélyebb mélységtartomá-

nyokba. A migráció leghatékonyabb módja feltételezhetően vetőzónákhoz, repedésrendszerekhez kapcsolódik. A hidrogénmolekula kis kinetikus átmérője (2,89 Å) és a szénhidrogénektől jelentősen eltérő fizikai-kémiai tulajdonságai miatt – különös tekintettel a hidrogéngáz diffuzivitására szilárd fázisokban – a migrációs folyamatok modellezése jelentős kihívás. Figyelembe véve a hidrogén specifikus viselkedését és tulajdonságait, a szénhidrogéniparban használt migrációs modellek csak jelentős módosítással alkalmazhatók (TARI 2025). A hidrogén nagy mobilitását tekintve a csapdázódáshoz hatékony, az oldalirányú és felfelé történő migrációt is megakadályozó zárókőzetek szükségesek, melyek geometriája optimális a csapda kialakulására. A hidrogén csapdázódásának lehetősége a szénhidrogénekhez képest tehát sokkal korlátozottabb, csak rendkívül kis permeabilitású zárókőzetekhez, elsősorban evaporitokhoz (kősó, gipsz, anhidrit) kötött, amelyek egyébként a szénhidrogének esetén is a leghatékonyabb zárókőzetnek tekinthetők. Ugyanakkor a mali példa arra is rávilágít, hogy tömör, repedésmentes magmás kőzet vagy teleptelér is képezhet megfelelő zárást. A potenciális hidrogéncsapdák élettartamára vonatkozólag nincsenek még becslések (a bizonyított hidrogénmezők hiányában), azonban fennmaradásuk ideje a hidrogén mobilitása miatt vélhetően sokkal kisebb, mint a szénhidrogénrendszerek esetén. A hidrogén megaszivárgásokhoz (~fókuszált hidrogén gigázosodásokhoz) köthető, szén-



2. ábra. A természetes hidrogén különböző megjelenési formái a szénhidrogénrendszerekkel való hasonlóságok (bal oldal) és különbségek (jobb oldal) tükrében (TARI 2025)

Figure 2. Cartoonish overview of documented hydrogen occurrences which appear to be similar (left) versus different (right) from play types known from petroleum exploration (TARI 2025)

hidrogénekhez képest 4-5 nagyságrenddel nagyobb gázfluxusa egyértelműen rámutat a hidrogénrendszerek dinamikus természetére, ami jelentős különbség az alapvetően statikus szénhidrogénrendszerekhez képest.

A szénhidrogénrendszerekkel való hasonlóságok és különbségek alapján alapvetően a hidrogénrendszerek két nagy csoportját különíthetjük el (2. ábra; TARI 2025): azokat a rendszereket, amelyeknél 1) jelen vannak a szénhidrogénrendszerek alapvető komponensei (csapda-zárókőzet), illetve 2) a zárókőzet hiányában felszíni hidrogénkigázosodással jellemezhető, sajátos megjelenési formákat. A következő fejezetben ezen fő hidrogénelőfordulás-típusokat mutatjuk be globális példákon keresztül, rámutatva a hidrogénrendszerek szénhidrogénrendszerekhez kötődő aspektusaira és sajátosságaira.

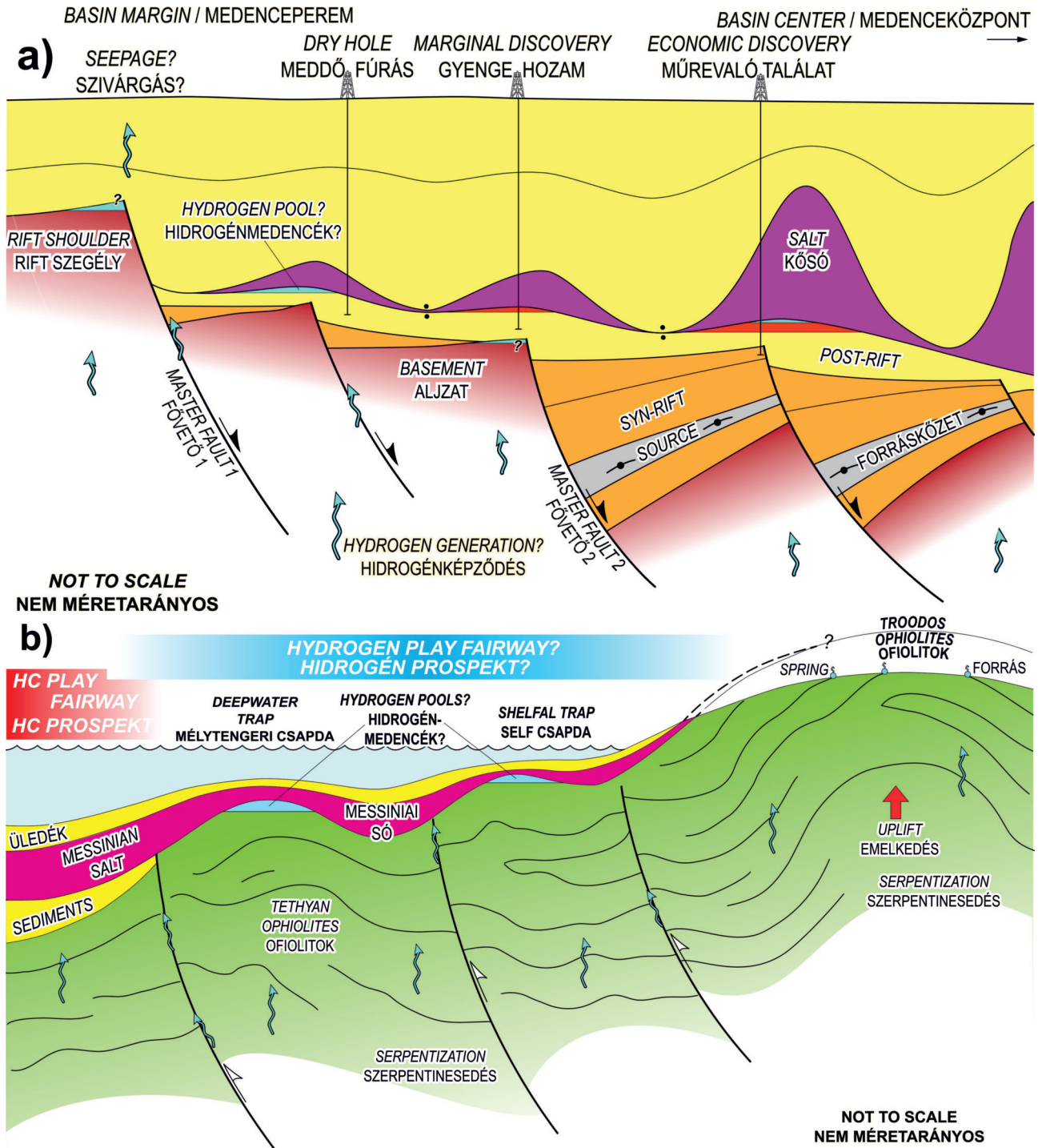
## A hidrogénrendszerek típusai globális példákon keresztül

### Valós felhalmozódások csapda-zárókőzet-rendszerrel

A működő csapda-zárókőzet-rendszerrel jellemezhető hidrogénelőfordulások egyik csoportja az evaporitos zárókőzetekhez kötődik, amelyek – hatékony csapdát alkotva – lehetővé teszik a hidrogén rezervoárokban történő felhalmozódását. Az evaporitos hidrogénfelhalmozódásokra elsősorban működő gázmezőkön találtak indikációkat, sok esetben hélium kíséretében. Számos szénhidrogén-kutató fúrásban mértek jelentősnek mondható hidrogéngáz-koncentrációt (~ 5–20%), például a francia Vaux-en-Bugey-gázmezőn (DERONZIER & GIOUSE 2020), az ukrán Dnyeper-

Donyeck-medencében (SHESTOPALOV et al. 2021) és az ausztrál Amadeus-medencében (LEILA et al. 2022). A gázmezők példái alapján számos természetes hidrogén kutatási projekt kezdődött evaporitos környezetben, például a Pireneusok előterében (Monzon-projekt: <https://helios-aragon.com/aragon-project>). Az ukrán Dnyeper–Donyeck-medence földgázkutatással kevésbé érintett peremterületei is jelentős hidrogénpotenciállal rendelkezhetnek, ahol 1) az Ukrán-pajzs mint hidrogénforrás (proterozoikumi aljzatban radiolízis útján), 2) fő törésrendszerek mint migrációs útvonalak, illetve 3) a sókőzetek mint csapdák biztosítják a hidrogénrendszer elemeit (3a ábra). Egy másik példaterület, amely jelentős hidrogénpotenciállal rendelkezhet, a ciprusi ofiolitokhoz és a tenger alatti zónákban található kősóhoz kapcsolódik. A Ciprus szigetén kibukkanó Troodos-ofiolitok szerpentineződés révén jelentős hidrogénképző potenciállal rendelkeznek, és bár a szárazföldi területeken a hidrogén nem tud csapdázódni, a tengerfenék alatt elterjedt sókőzetek lehetőséget biztosíthatnak a tenger alatti rezervoárokban történő felhalmozódásra (3b ábra).

Az elsőként felfedezett Bourakébougou-hidrogénmező (Mali) a potenciális hidrogénrendszerek tekintetében különlegesnek mondható, hiszen itt a hidrogén csapdázódását nem evaporitos zárókőzet, hanem rétegpárhuzamosan benyomult magmás kőzet, dolerittelér biztosítja (2. ábra), illetve a gázkeverék szinte tisztán (98%) hidrogént tartalmaz. A Bourakébougou-hidrogénmezőn tág mélységtartományokban (35–135 m és 1125–1500 m) helyezkednek el elkülönült (karbonátos és sziliciklasztos) tárolók, a hidrogénfelhalmozódás becslült mértéke ~50–100 milliárd m<sup>3</sup>. A mezőn mélyült ~30 kutatófúrás ellenére jelenleg csak egy termelőkut aktív, amelyben a nyomás viszonylag alacsony (4 bar), a kitermelés 7 éve folyamatos, és nincs indikáció a mező kime-



3. ábra. Szénhidrogénrendszerekhez hasonló, evaporitos csapda-záróközzel rendelkező hidrogénrendszerek, ahol a hidrogén forrása a) a proterozoikumi aljzat (Ukrán-pajzs, a hidrogéntermelő folyamat a radiolízis), illetve b) ofiolitok (a hidrogéntermelő folyamat a szerpentinésedés) (TARI 2025)

Figure 3. Play type cartoon examples of hydrogen systems similar to hydrocarbon systems with evaporite traps. The hydrogen generation mechanisms are (a) radiolysis (Dnieper-Donets Basin of Ukraine) and (b) serpentinization (ophiolites in Cyprus) (modified after TARI 2025)

rülésére. A Bourakébougouhoz hasonló esetekben úgy gondolnánk, hogy a több csapdában felhalmozódott hidrogénkészletek végesek, és így a hidrogénkutatás módszertana valóban sok hasonlóságot mutatna a szénhidrogén-kutatásával. Azonban a gázkémények és a felszíni mélyedések (ún. tündércörök) jelenléte a medence tágabb területén arra

utal, hogy a hidrogéngáz keletkezése és/vagy migrációja még mindig aktív. A bourakébougoui fúrásokban talált gázkeverék modellezése alapján a csapdák feltöltéséhez szükséges idő rendkívül rövid, csupán néhány száz év volt, ami hangsúlyozza a hidrogénrendszer rendkívül dinamikus természetét. Ezért a látszólag átmeneti, rövid élettartamú (le-

hetséges, hogy csak 500 éves) bourakébougoui felhalmozódás csupán egy szerencsés „pillanatfelvétel” lehet egy hidrogéncsapdáról, amely rövid élettartama, egyedi csapadózási típusa és gázösszetétele miatt egyáltalán nem reprezentatív a globális természetes hidrogénfelhalmozódásokra nézve (TARI 2025).

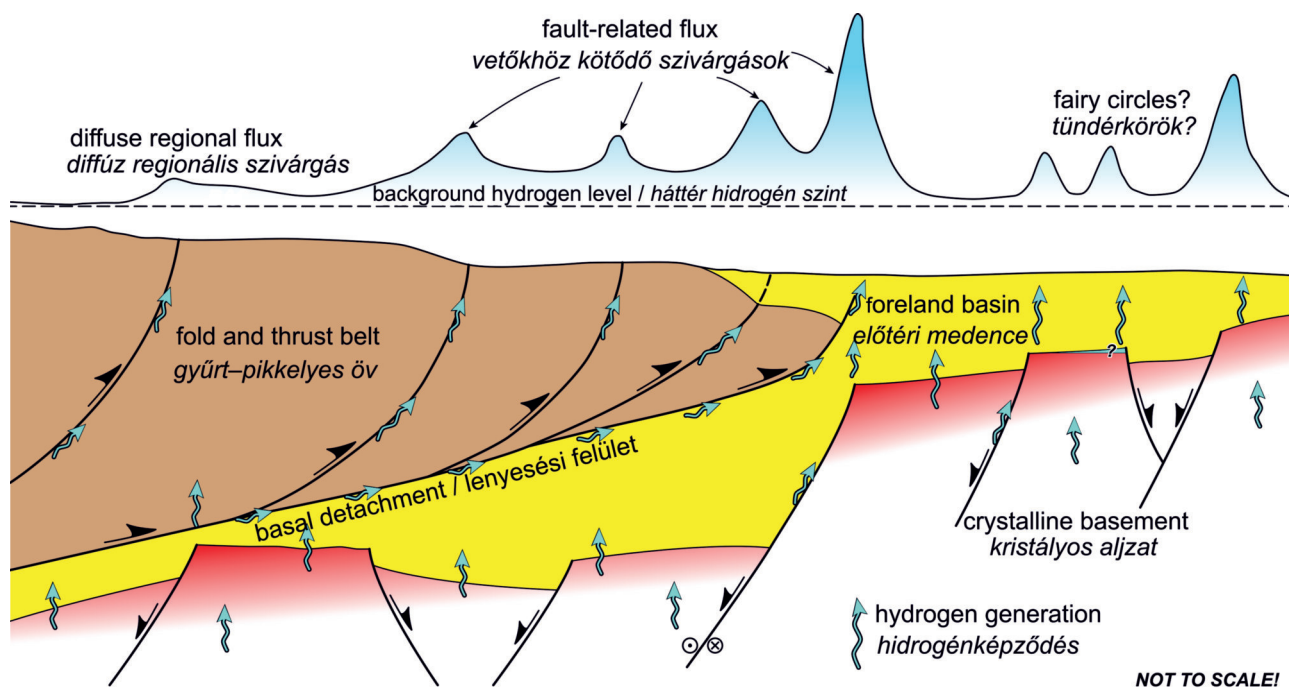
Albániában, a Dinaridák–Hellenidák hegységrendszerben egy a bourakébougoui hidrogénmezőtől jelentősen különböző, kevésbé konvencionális csapdahelyezettel rendelkező természetes hidrogén-előfordulást fedeztek fel az 1990-es években. A Bulqizë ofiolitmasszívum, amely a Keleti-Mirdita-öv része, kivételes földtani környezetet biztosít a természetes hidrogén keletkezéséhez (DONZÉ et al. 2024, TRUCHE et al. 2025). A mintegy 6 km vastag, főként harzburgitból és dunitből álló kőzettest mélyebb részében a geofizikai mérések és modellek alapján jelenleg is aktív serpentinisedés folyhat (YAO et al. 2025). Mindazonáltal az itt található mélyszinti krómítit-bányában végzett legújabb vizsgálatok olyan eredményeket hoztak, amelyek megkérdőjelezzik a természetes hidrogénrendszerre feltételezett paradigmákat, csakúgy mint Bourakébougou esetében. A bányá legmélyebb szintjén, egy szűk tektonikai zónára korlátozódó folyamatos és jelentős (200 tonna/év  $H_2$  gáz) hidrogénemisszió nem magyarázható kizárólag az aktív serpentinisedéssel vagy a fluidumzárványok dekrepitációja (~repedezése) során felszabaduló gázokkal (TRUCHE et al. 2025). A földtani kutatás eredményei szerint a bourakébougoui hidrogénmezővel ellentétben itt a hidrogén egy törérendszer mentén kialakult rezervoárban halmozódhatott fel. Bár ez a rezervoár a befogadó peridotit kis porozitása miatt vélhetően nem számottevő méretű, azonban fontos bizonyíték a

hidrogén hosszú távú akkumulációjára. Továbbá az előforduló hidrogén- és metángáz stabil- és radioaktív-izotópkémiai vizsgálata rávilágított területen végbemenő serpentinisedési folyamat „fiatal” jellegére és a gázok képződési mechanizmusára, ami alapjaiban formálja át a természetes hidrogénrendszerek időbeli fennállásáról alkotott eddigi képet (TRUCHE et al. 2025). A bányában keringő vizek tríciumadatai 10 évnél fiatalabb kort mutatnak – és bár a gázrendszer áramlása ettől elkülönül –, a hidrogénnel együtt megjelenő metán ~26 000 éves radiokarbon kora azt jelzi, hogy a gázképződés nem évmilliókkal ezelőtti folyamat, hanem a legutóbbi eljegesedést követően reaktiválódhatott, ami geológiai léptékkal mérve „fiatal” rendszert jelez (TRUCHE et al. 2025). Ez a felfedezés kritikus jelentőségű a tiszta energiaforrások szempontjából, mert azt mutatja, hogy az ofiolitövekben képződő geológiai hidrogén (a szénhidrogénekkal ellentétben) kevésbé jellemezhető véges, fosszilis készletként, hanem egy folyamatosan megújuló, aktív fluidum-közet kölcsönhatásból táplálkozó erőforrás lehet, amit a Bulqizë-ban található bányában mért, évi több mint 200 tonna léptékű kiáramlás is jelez (TRUCHE et al. 2024).

#### Felszíni hidrogénkigázosodások

A természetes hidrogén hagyományos csapda-záróközet-rendszerek hiányában is megjelenik a felszínen. A hidrogénmolekulák mozgékonyságának köszönhetően alakulnak ki a megaszivárgások, illetve kisebb, törérendszerkehez kapcsolódó szivárgások is (4. ábra).

A megaszivárgások felszíni mélyedéseket, ún. tündérkört (fairy circle) alakítanak ki, elsősorban laza üledékek-



4. ábra. Csapda-záróközet hiányában kialakult, felszíni hidrogéniszivárgások megjelenési formáinak koncepcionális modellje és a kapcsolódó törérendszerke kritikus szerepe (TARI 2025)

Figure 4. Surface manifestations (no traps like in hydrocarbon exploration) of hydrogen in connection to migration along fault systems (modified after TARI 2025)

ben. Az első dokumentált tündérrkör Oroszországban, a Moszkva melletti Elektrostal közelében található (LARIN et al. 2015), azonban a föld számos területén, például Ukrajnában, az Amerikai Egyesült Államokban, Braziliában, Namíbiában és Ausztráliában is előfordulnak hasonló szerkezetek (FRERY et al. 2021, MORETTI et al. 2022, PRINZHOFER et al. 2019, ZGONNIK et al. 2015), általában ősmasszívumokat fedő üledékes környezetben. A tündérrkörök néhány 10–1000 méteres átmérőjű, növényzeti anomáliával (általában elhaló növényzet) járó, felszíni depressziók (5. ábra), amelyek jelentős, talajban mérhető hidrogéngáz-koncentrációt mutathatnak (PRINZHOFER et al. 2019), és így felszín alatti hidrogénfelhalmozódást indikálhatnak. Érdeemes megjegyezni, hogy a potenciális, csapda-záróközet-rendszerekhez köthető hidrogénfelhalmozódások tágabb környezetében (pl. Dnyeper–Donyeck-medence, Amadeus-medence) sok esetben jelen vannak a tündérrkörök. A természetes hidrogén ezen felszíni megjelenési formái proximiként szolgálhatnak a hidrogénfelhalmozódások kutatásában. Azonban a tündérrkörök hidrogénkigázosodás szempontjából nem feltétlenül aktív szerkezetek, talajgeokémiai mérések alapján a hidrogénkoncentráció csak egyes tündérrkörökben anomálishan magas (FRERY et al. 2021), rámutatva a tündérrkörökhöz kapcsolódó hidrogénfluxus időbeli változékonyságára.

A tündérrkörök iránt tehát jelentős ipari érdeklődés alakult ki, azonban a szerkezetek kialakulásának mechanizmusa, amely alapvető információt nyújtana a kapcsolódó hidrogénkészletekről, még nem teljesen világos. Eddigi ismereteink arra utalnak, hogy a tündérrkörök a felszín alatt, üledékes kőzetekben kialakult, tölcser alakú gázfeláramlási zónákban folytatódnak. Numerikus geomechanikai modellekkel (DETOURNAY & SCHÖPFER 2026, SCHÖPFER et al. 2025) hidrogéntermelő aljzat vagy hidrogénrezervoár tetejéről kiinduló, pontszerű forrást (2. ábra) és kétfázisú áramlást feltételezve sikerült reprodukálni a valóságban megfigyelt tündérrkörök geometriáját, rámutatva, hogy a tündérrkörök mérete és geometriája indikálhatja a felszín alatti hidrogénfor-

rás mélységét és erősségét. Eddigi megfigyelések alapján a tündérrkörök gyorsan változó, geológiai időskálát tekintve rövid élettartamú szerkezetek, így az aktív hidrogénkigázosodás és a kapcsolódó, felszín alatti hidrogénfelhalmozódás jelenléte is valószínűsíthetően időben korlátozott. A tündérrkörök teljesebb körű megértése azonban még várat magára, a további kutatások elengedhetetlenek a felszín alatti potenciális hidrogénkészletek becsléséhez.

A felszíni hidrogénszivárgások másik megjelenési formája felszínre kifutó törésekhez kapcsolódik (2. ábra). Jelentős hidrogénkoncentrációkat mértek például az észak-pireneusi frontális feltolódás mentén (LEFEUVRE et al. 2021), ahol a hidrogén további gázokkal (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, Rn) kísért megjelenést mutat. További, vetőzónához kapcsolódó hidrogénanomáliákat találtak például az osztrák Lavanttal-medence területén (BEZWODA et al. 2026), illetve a Brazília déli partvidékén fekvő Marica környezetében (PRINZHOFER et al. 2024). A vetőzónák hidrogénmigrációban betöltött kritikus szerepét már említettük, ezek porózus/permeábilis szállítási útvonalat biztosítanak a hidrogén (és hélium) számára. Ha a hidrogénmigrációt biztosító törések elérik a felszínt, a sekély vetőzónák megfűrésével lehetőség adódhat a hidrogén kiaknázására. Ehhez elengedhetetlen azoknak a vetőzónáknak a részletes feltérképezése és szerkezeti megértése, amelyek képesek szállítani a hidrogént, mint például a töréseket övező kárzónák, illetve a jelenleg is aktív vetők.

## A természetes hidrogén kutatása – új eszközök és módszerek a szénhidrogén-kutatáshoz képest

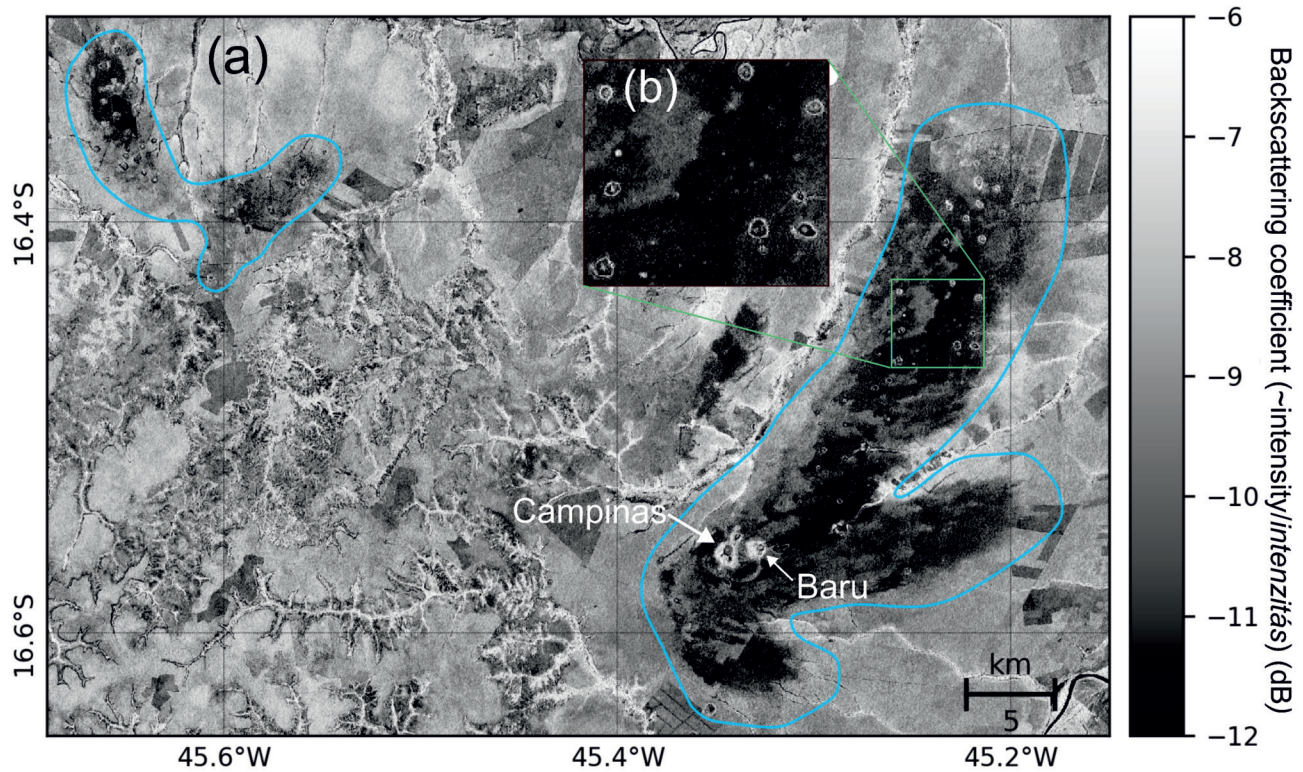
Jelen fejezetben bemutatjuk a természetes hidrogén kutatására vonatkozó, legelterjedtebb kutatási módszereket. Példákkal illusztráljuk a (műholdas) távérzékelés különböző típusú alkalmazásait, a hidrogénszivárgások kimutatásának legfontosabb eszközét: a talajgáz geokémiai méréseket, illetve az komplex gázösszetétel vizsgálatokat.

### Távérzékelés

A földfelszínt vizsgáló, műholdalapú távérzékelési módszerek elsősorban a tündérrkörök azonosítására alkalmazhatók. Számos aktív és passzív távérzékelési módszer alkalmas a szerkezetekhez kapcsolódó különböző (pl. geometriai, növényzeti, hőmérsékleti, talajnedvesség-tartalom) anomáliák azonosítására (BÉKÉSI et al. 2026, 6. ábra), illetve a potenciális hidrogénforráshoz, illetve a talaj összetételéhez kapcsolódó ásványindexek feltérképezésére (MOSQUERA-RIVERA et al. 2024). A műholdfelvételek mellett a geofizikai (pl. mágneses és gravitációs anomáliatérképek) adatrendszerek is segíthetnek a tündérrkörök és a kapcsolódó szerkezetek megértésében (FRERY et al. 2021). A tündérrkörök hatékonyabb azonosítására alkalmaznak mestersé-



5. ábra. Hidrogénkigázosodást jelző „tündérrkörök” Braziliából (forrás: Alain PRINZHOFER)  
Figure 5. Hydrogen-seeping fairy circles in Brazil (source: Alain PRINZHOFER)



**6. ábra.** (a) Átlagos Szintetikus Apertúrájú Radar (SAR) intenzitásfelvételek a brazil São Francisco-medence tündérköreiről (BÉKÉSI et al. 2026). Az intenzitásértékek a visszavert jel amplitúdójával arányosak, és a felszínborítottság, visszaverődési mechanizmusok függvényében változnak ([https://hyp3-docs.asf.alaska.edu/guides/introduction\\_to\\_sar/](https://hyp3-docs.asf.alaska.edu/guides/introduction_to_sar/)). A tündérkörökben gazdag területek sötét színnel (alacsony intenzitás) mutatkoznak a növényzet hiánya miatt. (b) A tündérkörök sajátos, könnyen azonosítható megjelenése a SAR-felvételeken: fehér körvonal (fákból álló gyűrű) és fehér középpont (fák a tündérkörök közepén)

**Figure 6.** (a) Average Synthetic Aperture Radar (SAR) intensity image of fairy circles in the São Francisco Basin, Brazil (BÉKÉSI et al. 2026). (b) Insert SAR backscatter image, highlighting fairy circles with white outline (ring of trees) and white pixels in their central part (spot of trees)

gesintelligencia-alapú módszereket is, amelyek műholdképek elemzésével lehetővé teszik a potenciális formák automatikus kijelölését nagy kiterjedésű, kevésbé ismert területeken (ROCHE et al. 2025).

Tekintve a tündérkörök tranziens természetét (gyors kialakulás, növényzeti, morfológiai változások), a távérzékelési eszközök nemcsak a tündérkörök feltérképezésére, hanem időbeli változásaiknak, fejlődésüknek monitorozására is alkalmasak lehetnek. Egy friss tanulmányban (BÉKÉSI et al. 2026) a brazil São Francisco-medence tündérkörein végeztek 5 éves időablakban műholdalapú megfigyeléseket Szintetikus Apertúrájú Radar-felvételek (Sentinel-1 műhold) segítségével. A módszertan – a tündérkörök feltérképezése mellett – lehetővé teszi a tündérkörökhöz kapcsolódó potenciális felszínmozgás, valamint a növényzet és a talajnedvesség-tartalom változásainak leképezését magas tér- és időbeli felbontással.

A távérzékelési módszerek tehát hatékony eszközei a tündérkörök feltérképezésének, értékes megfigyeléseket adhatnak a tündérkörök jellemzőiről, azonban a felszín alatti, potenciális természetes hidrogénrendszerek megértése és feltérképezése további megfigyeléseket és modellalapú kutatásokat igényel. A terepi megfigyelések és mérések elengedhetetlenek a talajban lévő hidrogénanomáliák jelenlétének megállapításához, mivel más geomorfológiai szerkezetek, például a dolinák vagy az elhagyott bányaterületek is

hasonló geometriával rendelkezhetnek, így tévesen tündérköröknek értelmezhetők.

### Talajgáz-geokémiai mérések

A felszíni hidrogénszivárgások azonosítása kulcsfontosságú a természetes hidrogén kutatásában. Tündérkörökben végzett talajgáz-geokémiai vizsgálatok rámutatnak arra, hogy az anomális hidrogénkoncentráció felszínre áramló hidrogénfluxust jelezhet (MORETTI et al. 2021). A talajgeokémiai vizsgálatok tehát a hidrogénkutatás jelenleg legfontosabb eszközeinek tekinthetők. Fontos megjegyezni, hogy a talajgáz-összetétel mérésére használt eszköz, illetve a mérés kivitelezése, időtartama mind befolyásolhatja a mért hidrogénkoncentrációkat. A brazil Campinas-tündérkörben elvégzett hosszú távú (több hónapos) talajgeokémiai vizsgálatok rámutattak a mért hidrogénkoncentráció komplex, időben változó természetére. Valószínűleg a napi hőmérséklet- és nyomásingadozás, vagy az árapályjelenség (BURBEY 2010) hatására a koncentráció periodikusan változik, emellett magas amplitúdójú, random pulzációkat is azonosítottak, amelyek a mélyből feláramló hidrogénfluxushoz kapcsolódhatnak. Számos további tényező (pl. a talaj kapilláris pórnyomása, a talaj nedvességtartalma és összetétele, bakteriális eredetű hidrogéntermelés és fogyasztás) is befolyásolhatja a mért hidrogénkoncentrációt, így elengedhetetlen

a mért idősorok részletes kiértékelése, a rövid idejű mérések ismételt elvégzése és az esetleges mesterséges (pl. műszer talajba fúrása miatt kialakult) anomáliák elkülönítése (DAVIES et al. 2025).

Hidrogéngázosodás-mintázatok nemcsak tündérkörökkel hozhatók összefüggésbe, hanem már más környezetben is, pl. a törésekhez kapcsolódóan is kimutatták (PRINZHOFER et al. 2024). Példaként bemutatjuk egy talajgáz-monitorozási kampány eredményeit a Keleti-Alpok területéről (7. ábra). A jelet 1 méter mélységben egy 1 perces, nagy felbontású, önálló talajgáz-megfigyelő eszköz rögzítette néhány héttig. Az itt bemutatott 3 napos példában a napi ingadozások jól megfigyelhetők, illetve a hidrogéncsúcsok kifejezett aszimmetriája a brazil tündérkörökben mért jelhez hasonló karakterisztikát mutat (TARI 2025).

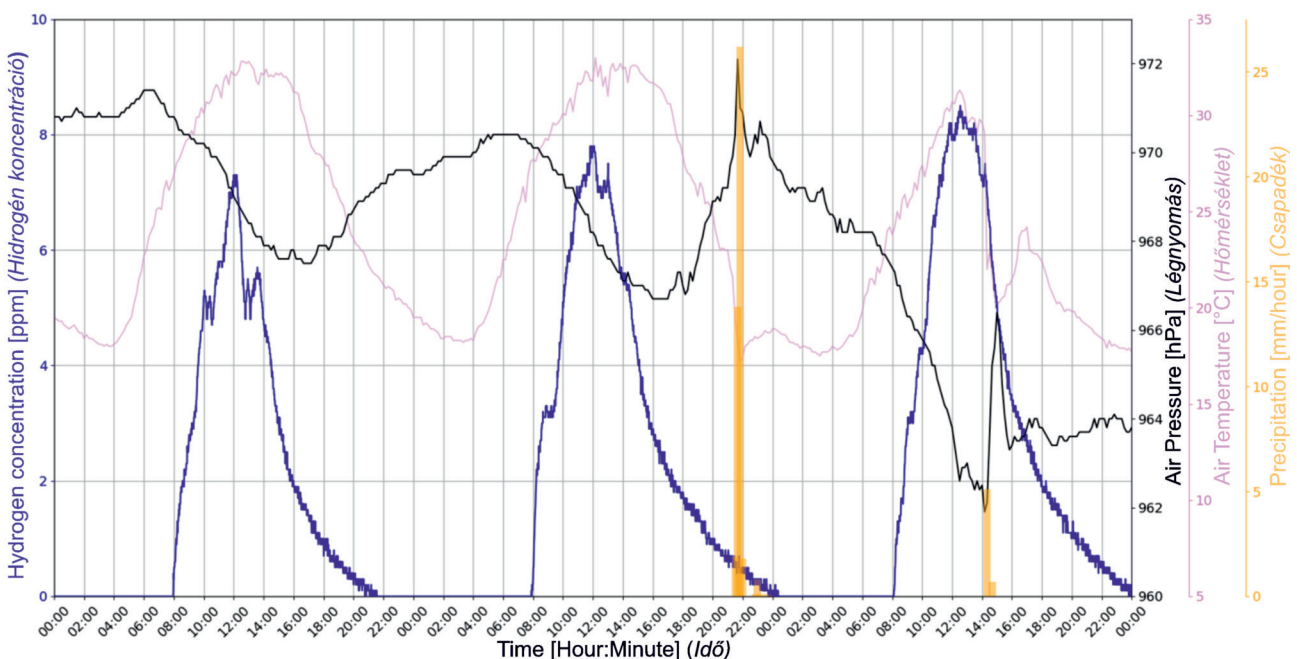
A talajgeokémiai mérések eredménye rámutathat a mélyebb hidrogénforrásokra, azonban a talajból származó komplex hidrogénjel nem ad egyértelmű bemenő információt a felszín alatti hidrogénfluxus és felhalmozódás számszerűsítésére. A mai napig vita tárgya, hogy mi minősül megbízható természetes (azaz geológiai) hidrogénjelnek, és hogyan lehet ezt megkülönböztetni a talajban egyszerűen fermentáció (biológiai hidrogén) által okozott jeltől. Hasonlóképpen, a diffúzió és az advekciónak relatív szerepe a hidrogént tartalmazó gázkeverék esetében a felszínhez közeli körülmények között további tanulmányok tárgyát képezi.

#### Egyéb komplex gázösszetétel-vizsgálatok

A hidrogén direkt azonosítása mellett egyéb gázok ( $\text{CO}_2$ , Rn, He,  $\text{CH}_4$ , N) jelenléte és arányai is közvetetten utalhatnak a hidrogén potenciális jelenlétére, forrására, ezáltal segítenek feltárni az esetleges mélyebb gáz migrációs útvo-

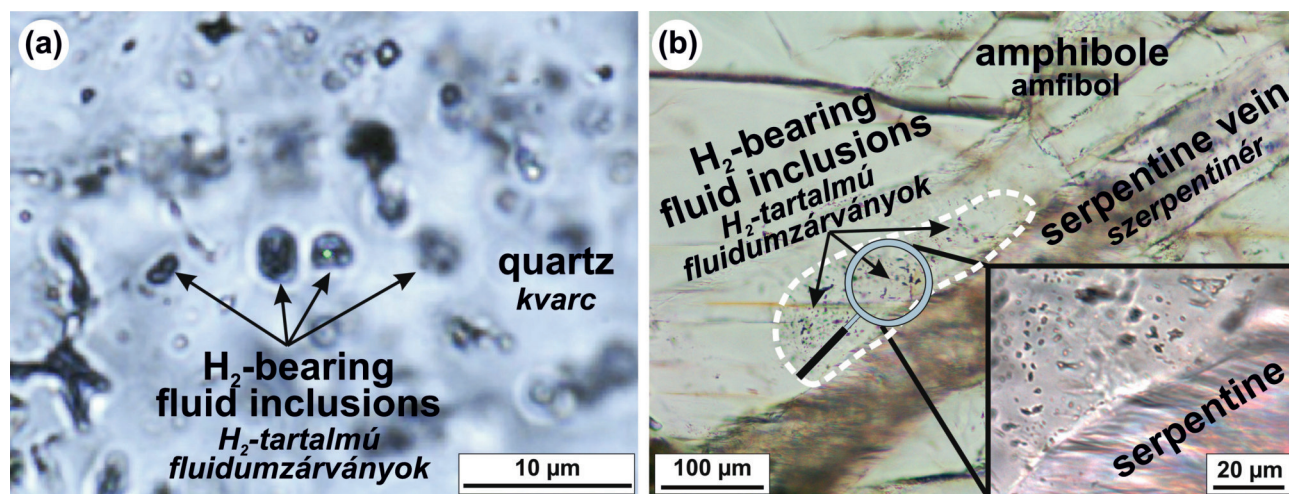
lakat. A hélium jelenléte, izotópos összetétele vagy hiánya tisztázhatja például a hidrogén keletkezésének eredetét, jelesül, hogy a radiolízis vagy a szerpentinesedés útján termelnek-e hidrogént, valamint a metán is proximiként szolgálhat aktív hidrogéntermelésre. A radon jelenléte például jelezheti a radioaktív kőzetek jelenlétét (LEFEUVRE et al. 2021), amelyek azután radiolízis útján hidrogént generálhatnak. A hidrogén és radon mérésére szolgáló műszerek fejlesztése Magyarországon is elindult (CSICSÁK & TÓTH 2024), a műszerek tesztelése folyamatban van. Emellett számos esetben sikerült a felszíni radonkoncentrációkat földrengéseményekkel összefüggésbe hozni (WOITH 2015), így a radon potenciálisan alkalmas lehet a hidrogén migrációs útvonalaként szolgáló zónák azonosítására is.

A felszíni kigázosodások geokémiai vizsgálatai mellett kőzetmintákból származó fluidumzárványok is értékes információkkal szolgálhatnak a hidrogén kutatásban mind a szerpentinesedéshez, mind a radiolízishez kötődő hidrogénrendszerek esetén. A hidrogéngáz áramlásával egyidejűleg kristályosodó ásványokban (elsődleges jelleggel), vagy az ásványok egykori, azóta beforrt repedéseiben (másodlagos jelleggel) apró, mikroszkopos léptékben megfigyelhető zárványokként csapdázódhat (8. ábra). Ez utóbbiakat kitöltő gázok/folyadékok összetételét egy nem nagy költségigényű és roncsolásmentes technikával, azaz a Raman-spektroszkópia alkalmazásával meg lehet határozni, beleértve a hidrogéngáz azonosítását is. A korábbi fluidumáramlásokról tanúskodó fluidumzárványok fizikai és kémiai tulajdonságainak meghatározása tehát lehetőséget nyújt a természetes hidrogéngáz keletkezési és felhalmozódási feltételeinek és áramlási útvonalainak leképzésére.



7. ábra. Nagy felbontású talajgáz-monitorozó eszközzel 1 m mélységben detektált hidrogénkoncentráció nyers idősora a Keleti-Alpokból (TARI 2025)

Figure 7. Hydrogen concentration measurements at 1 m depth acquired by a high-resolution soil-gas monitoring device (with no pump) deployed in the Eastern Alps (TARI 2025)



**8. ábra.** A földtani múlt hidrogénáramlásainak közvetlen képviselői: kőzetalkotó ásványokban bezáródott hidrogéngázt tartalmazó fluidumzárványok mikroszkópi felvételei. a) Radiolízishez kötődő, másodlagos fluidumzárványok kvarc befogadó ásványban a Kárpát-medence nyugati részéről; b) serpentinésedéshez kötődő, másodlagos fluidumzárványok amfibol befogadó ásványban ÉNy-Spanyolországból (SPRÁNITZ et al. 2021)

**Figure 8.** Direct representatives of hydrogen migration in the geological past: photomicrographs showing hydrogen-bearing fluid inclusions in various rock-forming minerals. a) Radiolysis-related secondary fluid inclusions in quartz from W Pannonian Basin; b) serpentinization-related secondary fluid inclusions in quartz from NW Spain (SPRÁNITZ et al. 2021)

### Természetes hidrogénpotenciál Magyarországon

A hazai hidrogénpotenciálról elsőként TARI Gábor (2023) akadémiai előadásán hallhatott a szakmai közösség, a jelen fejezetben ennek tartalmát fejtjük ki bővebben.

Közép-Európában több különböző kőzettípus is található, amelyek potenciálisan képesek természetes hidrogén generálására. Ezek közé tartoznak a) az alpi ofiolitegységek, amelyek még mindig serpentinésedésen mehetnek keresztül, és b) a hercini vagy régebbi gránitos aljzategységek, ahol a természetes hidrogén termelődése a radiolízisnek köszönhető. Bár Magyarországon még nem állnak rendelkezésre egyértelmű bizonyítékok átlagon felüli hidrogénkoncentrációról a talajszintben, a környező országokban zajlott előzetes kutatások arra utalnak, hogy a Pannon-medencében vannak olyan területek, ahol a hidrogén felszínre áramlása dokumentálható. Ez utóbbi feltételezést erősíti az a tény is, hogy országunkban számos hidrogéntermelés szempontjából fontos kőzet található, ami további érveként szolgál a hazai hidrogénpotenciál szélesebb körű vizsgálatának szükségességére. Továbbá, a szénhidrogénmezők analógiáját folytatva, a Pannon-medence rezervoárkőzetben kifejezetten gazdagnak tekinthető. A pannon-medencebeli hidrogéntárolás lehetőségeinek feltérképezése hazánkban is megkezdődött (GELENCSÉR et al. 2026), és ennek a kutatásnak a természetes hidrogénre vonatkozó jelentősége az, hogy vannak olyan porózus kőzetek, amelyek ásványos összetétele kedvező a hidrogéngáz megtartásához, tehát nem reagál vele.

Az ofiolitok egyik lehetséges kutatási területe a Vas-hegy térségében felszínen kibukkanó, penninikumi metamorf egységek. A Vas-hegy közelében, az osztrák oldalon található, badersdorfi serpentinittöfjeftőben magas hidrogénkoncentrációt lehet kimutatni a mélyben zajló serpentinésedésnek köszönhetően. A Vas-hegyen felszínközélen

található serpentinitek ÉK-i irányban a felszín alatt folytathatók és elérhetik a hidrogéngeneráció szempontjából kedvező, néhány km-es mélységtartományt (200-300 °C). A serpentinitek általánosságban lehatárolhatók például mágneses anomáliatérképek segítségével, ami alapján a Moson térségében található mágneses anomália indikálhatja a hidrogéngeneráció szempontjából kedvező mélységtartományban (~5-6 km) eltemetett serpentiniteket. A feltételezett eltemetett serpentinitek létezése és hidrogéntermelő potenciálja azonban még nem bizonyított, igazolásukra további, geológiai-geofizikai adatrendszeren alapuló kutatások szükségesek. A másik, triász-jura korú ofiolitos egység a Bükk térségében található (pl. Darnó- és Szarvaskő-egységek), amely szintén tartalmaz serpentiniteket, azonban ezek mélységtartománya nem ismert. A harmadik ofiolitos egységet a Mecsektől délre található paleozoikumi serpentinittestek alkothatják (FALUS György, szóbeli kommunikáció, 2026), amelyek létezését néhány sekély fúrás dokumentálja.

A serpentinésedéshez kötődő hidrogénpotenciál mellett az aljzati egységekben található gránitok (pl. Mórággyirő) is jelentős hidrogéntermelő potenciállal rendelkezhetnek radiolízis útján. Ezen egységek hidrogéntermelése nem bizonyított, azonban hidrogén jelenlétére utalhatnak a fúrásokban mért héliumelőfordulások (pl. Székesfehérvár és Battonya-Pusztaföldvár). Tekintve, hogy a granitoidok az ország különböző területein előfordulnak, részletes feltérképezésük és további kutatásuk kulcsfontosságú lehet a radiolízishez kötődő hidrogénpotenciál meghatározásában.

### Konklúzió

A természetes hidrogénrendszerek számos aspektusban hasonlítanak a szénhidrogénekhez, azonban a hidrogéngáz sajátos tulajdonságai (reakcióképesség, mobilitás) miatt a

hidrogénrendszerek valószínűsíthetően időben változó, dinamikus természetűek. A dinamikus jellegre utalnak a felszíni hidrogénszivárgások (tündércörök és kisebb, törésrendszerhez kötődő kigázosodások), amelyek indikációként szolgálhatnak felszín alatti hidrogén képződésére és migrációjára, potenciális felhalmozódásokra. A hidrogénkutatásban a szénhidrogéniparból ismert módszerek részben alkalmazhatók, azonban új eszközök és módszerek (pl. műholdas távérzékelés, talajgáz-geokémiai mérések, egyéb fluidumösszetételre vonatkozó vizsgálatok) szükségesek a hidrogén kialakulási potenciáljának, jelenlétének és felhalmozódásának kimutatására. A megfigyelés- és modellalapú kutatások integrálása, együttes értelmezése lehetőséget ad a hidrogénrendszerek tulajdonságainak és viselkedésének megismerésére. Az intenzív kutatások ellenére azonban a hidrogén keletkezési,

migrációs és csapdázódási folyamatainak, feltételeinek teljesebb körű megértése még várat magára, így a természetes hidrogén mennyiségi becslése is jelentős hibával terhelt. A piaci hasznosítás megalapozásához tehát elengedhetetlen a kitermelés lehetőségeinek pontosabb ismerete és a természetes hidrogénre vonatkozó szabályozási háttér megalkotása.

### Köszönetnyilvánítás

A bemutatott tanulmány a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által támogatott, PD147116 számú kutatási projekt, valamint a Magyar Tudományos Akadémia által támogatott FluidsByDepth Lendület-projekt (LP2022-2/2022) keretein belül készült el.

### Irodalom – References

- BÉKÉSI, E., PRINZHOFER, A., PORKOLÁB, K., TARI, G. & SZÁRNYA, C. 2026: Exploration and monitoring of “fairy circles” associated with natural hydrogen seepages with synthetic aperture radar backscatter analysis and interferometry in the São Francisco basin (Brazil). – *International Journal of Hydrogen Energy* **199**, 152767. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.152767>
- BEZWODA, N., SCHÖPFER, M., GRASEMANN, B. & TARI, G. 2026: *Fault Controlled Migration of Geogenic Hydrogen in the Lavanttal Basin (Austria)*. – Copernicus Meetings. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu26-5645>
- BURBEY, T. J. 2010: Fracture characterization using Earth tide analysis. – *Journal of Hydrology* **380/3–4**, 237–246. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.10.037>
- CSICSÁK, P. & TÓTH, S. 2024: *Development of an offline Natural Hydrogen and Radon detector*. – AAPG Europe Regional Conference, Kraków.
- DAVIES, K., JOSSE, R., FRERY, E., ESTEBAN, L., KESHAVARZ, A. & IGLAUER, S. 2025: Distinguishing drilling-induced artifacts from naturally occurring hydrogen in soil gas surveys: Insights from sub-circular depressions. – *International Journal of Hydrogen Energy* **109**, 1230–1240. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.094>
- DERONZIER, J.-F. & GIOUSE, H. 2020: Vaux-en-Bugey (Ain, France): the first gas field produced in France, providing learning lessons for natural hydrogen in the sub-surface? – *Bulletin de la Société Géologique de France* **191/1**. <https://doi.org/10.1051/bsgf/2020005>
- DETOURNAY, C. & SCHÖPFER, M. P. 2026: Numerical simulations of hydrogen seepage in “fairy circles”. – *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* **201**, 106482. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2026.106482>
- DONZÉ, F.-V., LEFEUVRE, N., TRUCHE, L., YAO, Y., VUJEVIĆ, I. & DUTOIT, H. 2024: Natural hydrogen exploration within Western European and the eastern Mediterranean ophiolites and ultramafic complexes. – *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* **24/4**, geochem2024-043. <https://doi.org/10.1144/geochem2024-043>
- ELLIS, G. S. & GELMAN, S. E. 2024: Model predictions of global geologic hydrogen resources. – *Science Advances* **10/50**, eado0955. <https://doi.org/10.1126/sciadv.ado0955>
- FRERY, E., LANGHI, L., MAISON, M. & MORETTI, I. 2021: Natural hydrogen seeps identified in the north perth basin, western Australia. – *International Journal of Hydrogen Energy* **46/61**, 31158–31173. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.023>
- GELENCSE, O., CSERESZNYÉS, D., SZAMOSFALVI, Á., BREITNER, D., KÖVÁGÓ, Á., SZABÓ, C., SZABÓ-KRAUSZ, Z. & FALUS, G. 2026: Geological potential of hydrogen storage in the Pannonian Basin complex. – *Geological Society, London, Special Publications* **555/1**, SP555-2023-198. <https://doi.org/10.1144/SP555-2023-19>
- GELMAN, S. E., HEARON, J. S. & ELLIS, G. S. 2025: *Prospectivity mapping for geologic hydrogen*. – 2330-7102, US Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/pp1900>
- LARIN, N., ZGONNIK, V., RODINA, S., DEVILLE, E., PRINZHOFER, A. & LARIN, V. N. 2015: Natural molecular hydrogen seepage associated with surficial, rounded depressions on the European craton in Russia. – *Natural Resources Research* **24**, 369–383. <https://doi.org/10.1007/s11053-014-9257-5>
- LEFEUVRE, N., TRUCHE, L., DONZÉ, F. V., DUCOUX, M., BARRÉ, G., FAKOURY, R. A., CALASSOU, S. & GAUCHER, E. C. 2021: Native H<sub>2</sub> exploration in the western Pyrenean foothills. – *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* **22/8**, e2021GC009917. <https://doi.org/10.1029/2021GC009917>
- LEILA, M., LOISEAU, K. & MORETTI, I. 2022: Controls on generation and accumulation of blended gases (CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/He) in the Neoproterozoic Amadeus Basin, Australia. – *Marine and Petroleum Geology* **140**, 105643. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105643>

- MORETTI, I., PRINZHOFER, A., FRANÇOLIN, J., PACHECO, C., ROSANNE, M., RUPIN, F. & MERTENS, J. 2021: Long-term monitoring of natural hydrogen superficial emissions in a brazilian cratonic environment. Sporadic large pulses versus daily periodic emissions. – *International Journal of Hydrogen Energy* **46/5**, 3615–3628. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.026>
- MORETTI, I., GEYMOND, U., PASQUET, G., AIMAR, L. & RABAUTE, A. 2022: Natural hydrogen emanations in Namibia: Field acquisition and vegetation indexes from multispectral satellite image analysis. – *International Journal of Hydrogen Energy* **47/84**, 35588–35607. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.135>
- MOSQUERA-RIVERA, J. E., JIMÉNEZ-VERGARA, J. M., ALBERTO, C., PHILIP, B. & MORALES, H. 2024: Preliminary Remote Spatial Analysis of Fairy Circles: an Approximation of Hypersectral and Geophysical Data from Hydrogen Seeps. – *First Break* **42/6**, 65–78. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.fb2024047>
- OSSELIN, F., SOULAIN, C., FAUGEROLLES, C., GAUCHER, E., SCAILLET, B. & PICHAVANT, M. 2022: Orange hydrogen is the new green. – *Nature Geoscience* **15/10**, 765–769. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-01043-9>
- PRINZHOFER, A., CISSÉ, C. S. T. & DIALLO, A. B. 2018: Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali). – *International Journal of Hydrogen Energy* **43/42**, 19315–19326. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.193>
- PRINZHOFER, A., MORETTI, I., FRANÇOLIN, J., PACHECO, C., D'AGOSTINO, A., WERLY, J. & RUPIN, F. 2019: Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins: The example of a Brazilian H<sub>2</sub>-emitting structure. – *International Journal of Hydrogen Energy* **44/12**, 5676–5685. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.119>
- PRINZHOFER, A., RIGOLLET, C., LEFEUVRE, N., FRANÇOLIN, J. & DE MIRANDA, P. E. V. 2024: Maricá (Brazil), the new natural hydrogen play which changes the paradigm of hydrogen exploration. – *International Journal of Hydrogen Energy* **62**, 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.263>
- RIGOLLET, C. & PRINZHOFER, A. 2022: Natural hydrogen: a new source of carbon-free and renewable energy that can compete with hydrocarbons. – *First Break* **40/10**, 78–84. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.fb2022087>
- ROCHE, V., DAYNAC, J., HESNI, S., GEYMOND, U., GINZBURG, N., PHILIPPON, J. & MORETTI, I. 2025: Global-scale AI-powered prediction of hydrogen seeps. – *Marine and Petroleum Geology*, 107617. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2025.107617>
- SCHÖPFER, M. P., DETOURNAY, C. & TARI, G. 2025: The mechanical genesis of “fairy circle” depressions. – *Geology* **53/9**, 712–716. <https://doi.org/10.1130/G53384.1>
- SHESTOPALOV, V., LUKIN, O., STAROSTENKO, V., PONOMARENKO, O., TSVETKOVA, T., KOLIABINA, I., MAKARENKO, O., USENKO, O., RUD, O. & ONOPRIENKO, A. 2021: Prospects for exploration of hydrogen fields in riftogene structures of platforms (the case of the Dnieper–Donets Aulacogene). – *Geofizicheskij Zhurnal* **43/5**, 3–18.
- SPRÁNITZ T., SZABÓ C., JÓZSA S. & BERKESI M. 2021: Retrográd metamorfóziszhoz kapcsolódó fluidumok egy variszkuszi szubdukciós csatornában: fluidumzárvány-vizsgálatok a Cabo Ortegal Komplexum ultrabázisos kőzeteiben. – *Földtani Közlemény* **151/2**, 121–121. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2021.151.2.121>
- TARI G. 2023: *A természetes hidrogén kutatása*. – Székfoglaló előadás, Magyar Tudományos Akadémia, Budapest.
- TARI, G. C. 2025: Natural hydrogen exploration: some similarities and differences with oil and gas exploration. – In: R. REZAEI & E. B. (szerk.): *Natural Hydrogen Systems: Properties, Occurrences, Generation Mechanisms, Exploration, Storage, and Transportation*. De Gruyter Academic Publishing, Berlin. <https://doi.org/10.1515/9783111437040-003>
- TRUCHE, L., DONZÉ, F.-V., GOSKOLLI, E., MUCEKU, B., LOISY, C., MONNIN, C., DUTOIT, H. & CEREP, A. 2024: A deep reservoir for hydrogen drives intense degassing in the Bulqizë ophiolite. – *Science* **383/6683**, 618–621. <https://doi.org/10.1126/science.adk9099>
- TRUCHE, L., DONZÉ, F.-V., MUCEKU, B., SIVAN, M., RÖCKMANN, T., LEVY, D., MOREIRA, M., LOISY, C., CEREP, A. & QUÉMÉNEUR, M. 2025: A dynamic H<sub>2</sub> system with multi-source methane in chromitite-rich ophiolitic settings. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2025.09.039>
- WOITH, H. 2015: Radon earthquake precursor: A short review. – *The European Physical Journal Special Topics* **224/4**, 611–627. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2015-02395-9>
- YAO, Y., DONZÉ, F. V., PERSEM, M., TRUCHE, L., MUCEKU, B., GARAMBOIS, S., VUJEVIC, I., LEFEUVRE, N. & GOSKOLLI, E. 2025: Magnetotellurics point to serpentinization as a potential source of hydrogen in the Bulqizë ophiolite. – *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **130/10**, e2025JB031898. <https://doi.org/10.1029/2025JB031898>
- ZGONNIK, V., BEAUMONT, V., DEVILLE, E., LARIN, N., PILLOT, D. & FARRELL, K. M. 2015: Evidence for natural molecular hydrogen seepage associated with Carolina bays (surficial, ovoid depressions on the Atlantic Coastal Plain, Province of the USA). – *Progress in Earth and Planetary Science* **2/1**, 1–15. <https://doi.org/10.1186/s40645-015-0062-5>

Kézirat beérkezett: 2026. 03. 30.