

Bárdossy György

az MTA rendes tagja

A RADIOAKTÍV HULLADÉK HAZAI ELHELYEZÉSÉNEK FÖLD- TUDOMÁNYI ALAPJAI

Elhangzott 1998. november 3-án

Az elmúlt évben, 1997-ben hazánk villamosenergia-termelésének 43,1%-át szolgáltatta a paksi atomerőmű. Ez egyben leggazdaságosabb hazai energiaforrásunk. Vajda György akadémikus (1998) értékelése szerint az atomenergia további évtizedeken át legfontosabb energiaforrásunk marad. Ehhez azonban az atomerőműnek a gazdaságosságon túl három biztonsági követelménynek is eleget kell tennie:

A) *Balesetmentes működés.* Ez a követelmény az atomerőmű termelésének megkezdése óta teljesült. A Nemzetközi Atomenergia-ügynökség (továbbiakban NAÜ) értékelése szerint a paksi atomerőmű a világ legbiztonságosabb atomerőművei közé tartozik. További balesetmentes működéséhez tehát megalapozott remény fűzhető.

B) *A normális üzemmenet minimális mértékben terhelje az atomerőmű környezetét többlétsugárzással.* Az 1988 óta folyamatosan működő megfigyelő- és mérőrendszer észlelései szerint a többlétsugárterhelés az ország területén észlelhető háttérsugárzásnak mintegy 1 ezrelékét teszi ki, tehát elhanyagolható nagyságú.

C) *Biztosítani kell az atomerőműben keletkező radioaktív hulladékok biztonságos elhelyezését.* Ez székfoglalom témája. Megjegyzem, hogy a paksi atomerőmű

mellett a Központi Fizikai Kutató Intézet kísérleti reaktorában, valamint egyes egészségügyi intézményekben is keletkeznek radioaktív hulladékok, amelyek elhelyezéséről szintén gondoskodni kell.

Általános alapismeretek

A NAÜ 1994-ben ajánlást adott ki a radioaktív hulladékok osztályozására. Ebben kis és közepes, valamint nagy aktivitású radioaktív hulladékokat különböztetnek meg. (*Aktivitás* alatt az időegységenként bekövetkező atombomlások számát értjük. Egysége 1 Bq /Becquerel/ $1 \text{ Bq} = 1 \text{ átalakulás/s.}$)

Az osztályozás alapja a radioaktív hulladékok *hőtelteljesítménye*. Amennyiben ez 2 kW/m^3 -nél nagyobb, úgy nagy aktivitású, amennyiben ennél kisebb, úgy kis és közepes aktivitású hulladékokról beszélünk. A kis és közepes aktivitású hulladékokat két alcsoportra osztották:

A) *Rövid élettartamúak* (nemzetközi jelölésük LILW-SL). Ezekben a mértékadó radioizotópok felezési ideje 30 évnél rövidebb. Ezekben a hulladékokban a hosszú élettartamú radionuklidok aktivitása nem lehet 400 Bq/g -nál nagyobb.

B) *Hosszú élettartamúak* (jelölésük LILW-LL). Ezekben a mértékadó radionuklidok felezési ideje 30 évnél hosszabb.

Figyelmet érdemel, hogy az 1989-ben kiadott és máig érvényben levő magyar szabvány *felületi dózistelteljesítmény alapján* különbözteti meg a kis és közepes, valamint a nagy aktivitású hulladékokat. A nagy aktivitású hulladékoknál ez 10 mGy/óránál nagyobb. $1 \text{ Gy (Gray)} = 1 \text{ J/kg}$.

A NAÜ ajánlásai szerint a kis és közepes aktivitású hulladékokat a felszínen vagy a felszín alatt kis mélységben (<200 méter) célszerű elhelyezni. Az ellenőrzött tárolási idő a leghosszabb felezési idejű radioizotópok felezési idejének tízszereséig tart. (A ^{137}Cs és a ^{90}Sr felezési ideje 30, ill. 29 év). A magyar előírás ennek a kétszeresével, tehát 600 évvel számol. Franciaországban és néhány más országban már működnek felszíni tárolók, más országokban a kutatások előrehaladott stádiumban vannak. Az utóbbi években a felszín alatti tárolók létesítése került előtérbe, nem annyira szakmai, mint inkább politikai megfontolások miatt.

Nagy aktivitású hulladékokat nagyobb veszélyességük miatt csak mélyen a felszín alatt (300–800 méter) szabad elhelyezni. A nagy aktivitású hulladékok egy része kiegészített fűtőelemekből áll, másik része a leszerelésre kerülő atomerőművekből származik. A kiegészített fűtőelemeket előbb 40–80 éven át az atomerőművek területén ún. átmeneti tárolókban helyezik el. Ez alatt veszélyes aktivitásuk egy részét elvesztik, továbbá hőtermelésük is jelentősen lecsökken. Csak ezután kerülnek végleges elhelyezésre a mélységi tárolóba. A nagy aktivitású

hulladékok ajánlott tárolási ideje kb. 10 000 év, radioizotópjaik hosszú felezési ideje miatt.

A radioaktív hulladékokat háromszoros gátrendszerrel különítik el a bioszférától:

A) *Műszaki gátak.* Acélhordók, konténerek ezek, amelyekben a hulladékot elhelyezik. Olyan anyagból készülnek, amely a korróziónak hosszan ellenáll. Újabban a hulladékot kvarchomokkal keverik és üveggé olvaszják. Ez a *vitrifikáció*, ami méginkább megnehezíti a radionuklidok kiszabadulását.

B) *Bányaműszaki gátak.* A tároló bányászati létesítményei ezek: a vágatok és silók, valamint ezek falai. A vágatfalak és a konténerek közötti teret olyan izolálóanyaggal töltik ki, amely jól megköti a radionuklidokat. Ilyen pl. a bentonit és a különböző zeolitok. Egyes helyeken ezen felül a tárolót közvetlenül körülvevő kőzet átítatásával kísérleteznek a vízáteresztő képesség csökkentése, ill. az izotópmegkötő képesség növelése céljából.

C) *Földtani gátak.* Azok a földtani képződmények ezek, amelyekben a hulladéktárolót elhelyezik. Ennek kedvező kőzettani, ásványtani, hidrogeológiai, geokémiai és izotópmegkötő tulajdonságai azok, amelyek a tárolóból kiszabadult radionuklidoknak a bioszférába való visszajutását megakadályozzák. Különösen fontosak az izotóptranszportot akadályozó geokémiai folyamatok, úgymint a redoxpotenciál és pH-változások, a hidrolízis, a komplexképződés, a kolloid vegyületek képződése, a szorpciós folyamatok és nem utolsósorban bizonyos mikrobiológiai folyamatok.

Az elmúlt évtizedekben a hulladéktárolók telephelykutatásának alábbi elvi sorrendje alakult ki:

1. *Áttekintő szakirodalmi tájékozódás.* A napjainkra létrejött számítógépes szakirodalmi lekérdező rendszerek segítségével ez a feladat könnyen megoldható.

2. *Telephelykiválasztás (site selection program).* Ez a tevékenység nagy térségek – kisebb országok esetében az egész ország – területének áttekintő értékelésével indul. A kizárandó területek egész sorát kell itt figyelembe venni, pl. lakott területek, üdülőkörzetek, utak, hidak, katonai és ipari létesítmények, ivóvízbázisok, működő bányák stb. Politikai okokból rendszerint egy több kilométeres határ menti sávot is kizárnak a felmérésből. A fennmaradó területeket alkalmasságuk szerint rangsorolják. Ennek alapján, valamint a minél rövidebb szállítási útvonal igényét figyelembe véve jelölik ki a kisebb *régiókat*, melyeken nagyobb részletességgel folytatják a kutatásokat. A régiókon belül általában egy-egy közigazgatási egységre kiterjedő *potenciális objektumokat* jelölnek ki, majd a helyi lakosság beleegyezésének alapján állítanak fel továbbkutatási rangsort. A kutatás 1–4 legkedvezőbbnek látszó objektumon folytatódik azért, hogy megghiúsulás esetén mindig maradjon alternatíva a továbbkutatásra.

A legkedvezőbbnek látszó objektumon indul meg a tároló tényleges telephelyének kiválasztása, amikor is újból 3-5 alternatívával dolgoznak. A telephelyek mérete a hulladékfajtától (kis, közepes, nagy aktivitású) és az elhelyezendő hulladék mennyiségétől, valamint a helyi földtani adottságoktól függ, rendszerint nem nagyobb 1 km²-nél.

3. *Telephelyjellemzés (site characterization program)*. Az elmúlt évtizedek során közmegegyezés született azokról a legfontosabb földtani, ásványtani, kőzet-tani, geokémiai, hidrogeológiai, tektonikai, geofizikai és kőzetmechanikai ismeretekről, amelyeket e kutatási fázisban megfigyelni, mérni és kiértékelni kell. Fontos szempont e tulajdonságok térbeli és időbeli változékonyságának megismerése. Geostatistikai módszerekkel ezek hatástávolságát is meg lehet határozni. A nagy aktivitású hulladékok nagyobb veszélyessége és a tárolási idő hosszabb volta miatt az utóbbi években egyre több helyen alakítottak ki ún. *mélységi laboratóriumokat (URL)*, melyekben több éven, sőt évtizedeken át is mérni lehet a legfontosabb telephelyjellemzőket. Az is kiderült továbbá, hogy fúrásokkal igen nehéz a zavart tektonikai zónák pontos megismerése és megmintázása. Erre sokkal alkalmasabbak a mélységi laboratóriumok vágatai.

A telephelyjellemzés első szakaszában az adatgyűjtésen és mérésen van a fő hangsúly, a második szakaszban az összefoglaló kiértékelés kerül előtérbe. Az első szakasz végét többnyire egy olyan összefoglaló jelentés képezi, amelyben a telephely alkalmasságáról kell állást foglalni, arról, hogy a telephely a továbbkutatásra alkalmas. A jelentés elkészítésének előfeltétele a felgyűlt sok adat miatt egy olyan *számítógépes adatbázis* kialakítása, amely egy szintetizáló kiértékelést lehetővé tesz. E kiértékelés során matematikai statisztikai módszereket is széles körben alkalmaznak. A kapott eredmények térbeli ábrázolását számítógépes térinformatikai módszerek segítik elő. A telephelyjellemzést egy összefoglaló *kutatási zárójelentés* fejezi be. Ebben a kiértékelés különböző térmodellek kialakításával bővül. Egy ilyen térmodell például a háromdimenziós talajvízáramlási modell.

4. *Biztonsági elemzés (safety analysis)*. Az adott telephelyre vonatkozó biztonsági elemzés már a telephely-jellemzés szakaszában megindul, és annak befejezésével teljeseedik ki. Az alábbi részekből áll (PAGIS 1988):

5. I. A legfontosabb telephelyjellemző adatok.

II. Hidrogeológiai, geokémiai és izotóptranszport modellek bemutatása.

III. Termokémiai elemzés. Ennek során azt számítják ki, hogy a radionuklidok hőtermelése következtében mennyire fog megnőni a tárolás során a tároló hőmérséklete. Meghatározzák a legmagasabb megengedhető hőmérsékletet és annak idő-intervallumát. Az ezt meghaladó hőmérséklet károsíthatja a tároló műszaki létesítményeit és izotópmegtartó képességét.

IV. Bizonytalanságelemzés (uncertainly analysis). Ez a felsorolt tulajdonságok meghatározásának bizonytalanságát értékeli a matematikai statisztika módszereivel. Ennek során többnyire 95%-os konfidenciaszintet alkalmaznak.

V. Scenario-elemzés. Azt vizsgálják, hogy miként reagál a tároló és a befogadó földtani képződmény az éghajlat, a talajvízszint, a talajvízáramlási rendszer és az erózió megváltozására. Milyen hatásokat okozhatnak továbbá földrengések és új töréses elmozdulások a tárolóban? A nagy aktivitású hulladékok hosszú tárolási ideje miatt véletlen emberi behatolás következményeit is értékelni kell.

VI. Érzékenységvizsgálat, amellyel a főbb tulajdonságok megváltozásának hatását vizsgálják egyenként, és ennek alapján fontossági sorrendet határoznak meg a hatások nagysága szerint.

VII. Kockázatelemzés. Ennek során kiszámítják a tároló létesítésével kapcsolatos és a tárolás teljes időtartamára kiterjedő kockázatokat, ami a tárolótérségében élő lakosságot érintheti.

Más irányú kockázatelemzésekhez hasonlóan determinisztikus és sztochasztikus módszereket alkalmaznak. E számításoknál is 95%-os konfidenciaszintet használnak. A kockázatelemzésnél nem határozzák meg külön-külön az egyes változók biztonsági kritériumait, hanem az alábbi összesítő biztonsági kritériumokat kell betartani:

- *Dóziskorlát.* Ez azt jelenti, hogy a tárolás teljes ellenőrzött időtartama alatt a lakosság egyedeit maximum 0,1 mSv/év többlet-sugárterhelés érheti. (1Sv/sievert/ = 1J/kg). Ehhez tudni kell, hogy hazánk területén a természetes radioaktív háttérsugárzás átlagosan 2,4 mSv/év (Szabó 1992).
- *Kockázati korlát.* A tárolóból származó és a bioszférát elérő többletsugárzás következtében a hulladéktároló térségében maximum 10^{-5} /év maradandó egészségkárosodás, ill. haláleset következhet be. Ez a szám 100 000 főre évente egy ilyen esetet jelent.

Rendkívül szigorú megkötések ezek, és joggal kérdezheti bárki: eleget lehet-e ezeknek tenni. A másik kérdés, ami kezdettől fogva nyugtalanította a szakembereket az, hogy extrapolálhatók-e néhány éves vagy évtizedes mérési eredmények több száz, ill. több ezer évre előre. Mi a realitása így a kockázatelemzéseknek? E kérdésekre a *természetes földtani analógiák* megtalálásával sikerült megnyugtató válaszokat kapni. Természetes sugárforrások olyan feldúsulásai ezek, melyek a földtörténet folyamán több millió, esetleg több százmillió évvel ezelőtt jöttek létre a földkéregben. Az elmúlt évtizedek során nyersanyagkutatói céllal számos ilyen radioaktív érctelepelt fedeztek fel. Kiderült, hogy több közülük a mai napig környezetétől elzárva maradt, más szóval

radioizotópjaik a felszíni bioszférát nem fertőzték meg. Kézenfekvő volt az a gondolat, hogy meg kell ismerni azokat a földtani gátakat, amelyek ezt az izolációt lehetővé tették, és a jövőben hasonló földtani képződményeket, ill. helyszíneket kell a radioaktív hulladékelhelyezésre megkeresni.

Ilyen példa a kanadai Saskatchewan tartományban, a Cigar-Lake közelében levő hatalmas uránérctelep, amely 1,3 milliárd évvel ezelőtt jött létre, és a felszín alatt 400-500 méter mélységben helyezkedik el. A telepet körülvevő földtani gátnak köszönhetően ez a telep a bioszférától mindmáig elzárva maradt. Az elmúlt évek folyamán nemzetközi együttműködéssel tanulmányozták a földtani gát tulajdonságait. Megállapították, hogy az uránérctelepet körülvevő agyagköpeny izotópmegkötő képessége, továbbá a talajvíz kedvező Eh-ja és pH-ja akadályozta meg a radioizotópok felszínre jutását (Cramer, Smellie 1994). Ha tehát a természetes izoláció évmilliók százain át többmillió tonnás radioaktív érctelepet el tudott zárni a bioszférától, akkor a földtani analógiák megfelelő felhasználásával reális esélyünk van aránytalanul kevesebb sugárzó anyagnak maximum 10 000 éven át történő biztonságos elzárására. Ez véleményem szerint a radioaktív hulladék elhelyezésének elvi, tudományos alapja. Még ennél is meggyőzőbb példa található Gabonban, ahol a geológusok egy spontán beindult és kb. fél millió évig tartó láncreakció nyomaira bukkantak anélkül, hogy ennek bomlástermékei a bioszférát érdemben szennyezték volna (Vajda Gy., 1991).

A természetes analógiák fontosságára való tekintettel az SCK CEN az Európa Tanács keretében kutatási tervet indított el *Natural Analogue Study Project* névvel, elsősorban az agyagkőzetek tanulmányozására (De Craen et al. 1998 draft proposal). Rendkívül fontosnak tartom, hogy ebben a nemzetközi munkában hazánk is részt vegyen.

A nemzetközi tapasztalatok összefoglalása

A nagy aktivitású hulladékok tárolóra vonatkozó nemzetközi tapasztalatokat, követelményeket az alábbi pontokba lehet összefoglalni:

1. A befogadó képződmény minimális méretei. Ugyanis hiába jók a képződmény ez irányú tulajdonságai, ha méretei elégtelenek. Mai ismereteink szerint legalább 1 km^2 alapterület és legalább 100 méter vastagság kell ahhoz, hogy egy képződmény tároló befogadására alkalmas legyen.

2. Az alkalmasságot meghatározó tulajdonságok a kiszemelt térrészen belül legyenek minél homogénebbek. Természetes, hogy egy földtani képződmény sohasem lehet teljesen homogén, de fontos követelmény, hogy minél kevesebb változás legyen a térrészen belül. Matematikai statisztikai módszerekkel

(ANOVA, MANOVA, One-way analysis of variance stb.) ez a követelmény numerikusan értékelhető.

3. Fontos követelmény a mértékadó tulajdonságok stabilitása, állandósága a külső körülmények megváltozásával szemben. A korábbiakban ismertetett scenario-elemzés során éppen ezt a követelményt vizsgálják. Természetesen a tárolóban fellépő változásokkal, pl. hőhatással szemben is minél stabilabb képződményekre van szükség.

4. A legfontosabb követelmény a lehető legnagyobb *radioaktív izolációs képesség*. Ennek legfontosabb összetevői a következők:

- a befogadó képződmény rossz vízvezető képessége;
- kedvező talajvízáramlási rendszer, vagyis a tárolóból esetleg kiszabaduló radionuklidok vizes oldatai minél hosszabb pályán és minél hosszabb idő alatt érhessek el a bioszférát;
- a talajvíz pH-ja és Eh-ja olyan legyen, hogy az csökkentse a radionuklidok oldhatóságát;
- a befogadó képződmény rendelkezzen minél nagyobb radionuklid-megkötő képességgel, amit elsősorban agyagásványok, zeolitok és más, nagy fajlagos felületű ásványzemcsék jelenléte segíthet elő;
- a befogadó képződményben a radionuklidok molekuláris diffúziója minél gyengébb és lassúbb legyen;
- az esetleges mikrobiológiai folyamatok is akadályozzák a radionuklidok továbbterjedését.

5. A befogadó képződmény hővezető képessége minél nagyobb legyen. A nagy aktivitású hulladékok hőteljesítménye igen nagy, de az idővel exponenciálisan csökken. Ez is egyik oka a korábbiakban említett, 40–80 éven át tartó átmeneti tárolásnak. Számítások szerint sűrűn elhelyezett hulladék esetén a föld alatti tárolás első ötven évében a tároló hőmérséklete 150–300 °C-ra is növekedhet, ami károsíthatja a tároló műszaki létesítményeit (Eriksson 1991). Ezért ma már a műszaki és földtani adottságok függvényében előre meghatározzák az adott tárolóban megengedhető legnagyobb hőmérsékletet.

6. Fontos követelmény a tároló képződmény minél kisebb tektonikai zavartsága. E tekintetben a töréses elmozdulások a legfontosabbak, különösen, ha tértágulások elmozdulásokról van szó. A több méter vagy több tíz méter vastag töréses zónákban nagyságrendekkel megnőhet a talajvíz áramlásának sebessége és vele együtt a radionuklidok migrációja. Ezért egyértelműen meg kell határozni, hogy a vizsgált térrészen belül zártak (kitöltöttek) vagy nyitottak-e a tektonikus repedések és a vastagabb törészónák. Tektonikailag zúzott zónákban a befogadó képződmény kőzetmechanikai tulajdonságai is leromolhatnak, ami a tároló bányászati kialakítását fogja nehezíteni. Végül az is igen

fontos, hogy napjainkban is folytatódó tektonikai elmozdulások ne veszélyeztessék a tároló épségét. Ennek megállapítására eddig főként neotektonikai, geomorfológiai és geofizikai módszereket használtak. Ezeket napjainkban a korszerű GPS-hálózat (Global Positioning System) kiépítésével egészítik ki.

7. A tároló térsége minél kevésbé legyen földrengésveszélyes, hiszen a földrengések a tárolók felszíni létesítményeit veszélyeztethetik. Fontos továbbá a befogadó képződmény minél kisebb szeizmikus érzékenysége. A több száz méter mélyen levő tárolókra ugyanakkor a földrengések alig jelentenek veszélyt.

8. A befogadó képződmény minél kedvezőbb kőzetmechanikai és bányaműszaki tulajdonságokkal rendelkezzen, pl. jó állékonyság, kedvező szilárd-ságtani tulajdonságok, minimális duzzadóképeség stb.

9. Könnyű bányászati hozzáférhetőség és a felszíni létesítmények kis veszélyeztetettsége földcsuszamlásokkal vagy árvizekkel.

A felsorolt követelmények közül egyértelműen a radioaktív izolációs képesség a legfontosabb, majd ezután következnek a kedvező termikus tulajdonságok. A kis és közepes aktivitású hulladékok tárolóira is ugyanezek a szempontok érvényesek, de jóval kisebb aktivitásuk és hőteljesítményük miatt a követelmények kevésbé szigorúak.

Fontos, nemzetközileg elfogadott szempont az, hogy a felsorolt követelményeket nem kell egyenként számszerűsíteni. A követelmények együttes hatása a döntő, amit az előzőekben ismertetett dóziskorlát és kockázati korlát számszerűsít. További nemzetközi tapasztalat az, hogy a kutatásokat nem szabad egyetlen potenciális telephelyre korlátozni, hanem tartalék telephelyeket is ki kell jelölni előre nem látott akadályok esetére.

Az eddig leggyakrabban számításba vett befogadó kőzeteket az 1. táblázat tartalmazza. Leggyakoribb a *gránit*, nagy területi kiterjedése, szilárdsága, stabilitása és viszonylagos homogenitása miatt. Ugyanakkor a gránit csak korlátozott izotópmegkötő képességgel rendelkezik. Különbséget kell tenni továbbá az ősi pajzsok tektonikailag nyugodt, hatalmas gránittömegei és az orogén övek jóval kisebb kiterjedésű és erősebben tektonizált gránitjai között. A gránit után az *agyagkőzetek* következnek a puha, plasztikus agyagtól az agyagkővön át az agyagpaláig, továbbá az agyagmárgáig. Kedvező tulajdonságai a rossz vízvezető képesség és a nagy izotópmegkötő képesség. Emiatt az utóbbi években egyre többre értéklik az agyagkőzeteket a kérdés szakemberei. A harmadik leggyakoribb csoport a *kőso*, akár zavartalan kősoarétegek, akár sódómk formájában. Kedvező hidrogeológiai és plasztikus tulajdonságai miatt kedvelik. Az utólagos hatásokra azonban a többi szilárdabb kőzetnél érzékenyebbek. Az Egyesült Államok Nevada államában levő Yucca Mts.-ban épülő mélységi tároló befogadó kőzete *zeolitos vulkáni tufa*, amely kiemelkedően jó izotópmegkötő

tulajdonságokkal rendelkeznek. Hátrányosak viszont a neotektonikai mozgások és a képződmény korlátozott stabilitása.

Eddig egyetlen nagy aktivitású hulladéktároló kutatását sem fejezték be, ami érthető, ha figyelembe vesszük, hogy az első atomerőművet 1954-ben a volt Szovjetunióban (Ogyinszk) helyezték üzembe. Az atomerőművek számával együtt nőtt a telephelykutatások száma és mérete. A kiégett fűtőelemek általánosan elfogadott átmeneti tárolása miatt még bőven van idő a telephelykutatás befejezésére és a tárolók megépítésére. A szerteágazó munkák miatt egyre fontosabb viszont a nemzetközi együttműködés és a tapasztalatok kölcsönös megismertetése. Ez a hazai telephelykutatásnak is elsőrendű érdeke.

1. táblázat

Radioaktív hulladékelhelyezésre eddig kiválasztott kőzetek

Argentína	gránit
Belgium	agyag (oligocén)
Cseh Köztársaság	gneisz
Dél-afrikai Köztársaság	gránit
Egyesült Államok	zeolitos vulkáni tufa, gránit, kősórétegek
Finnország	gránit
Franciaország	gránit, agyag, agyagpala, agyagmárga, kősó
Hollandia	kősódóмок
Japán	gránit, agyagkő
Kanada	gránit
Kína	gránit, agyagkő
Nagy-Britannia	agyag, vulkáni tufa
Németország	kősódóмок, vasérc
Olaszország	agyag, agyagmárga
Oroszország	gránit, kősó
Spanyolország	gránit, agyag, kősó
Svájc	gránit, márga, agyag
Svédország	gránit, gneisz

A paksi atomerőműben keletkező radioaktív hulladékok

A paksi atomerőműben 1988 óta állítanak elő villamos energiát négy VVER-440 típusú atomreaktorral. E tevékenység során – normális üzemmenet mellett – 1997-ben az erőműtől kapott tájékoztatás szerint 119 m^3 , fémhordókba tömörített, szilárd halmazállapotú, kis és közepes aktivitású radioaktív hulladék keletkezett. További 275 m^3 kis és közepes aktivitású radioaktív iszap is létrejött, amit ún. sűrítmenytartályokban helyeznek el. E tartályok telítettsége 1997 végén 70%-os volt, ami a telephelykutató és -létesítés viszonylagos sürgősségét jelzi.

A kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok izotóp-összetételét és felezési idejét a 2. táblázatban mutatjuk be. A sugárvédelem és a tárolási idő szempontjából a ^{90}Sr és a ^{137}Cs radioizotópok a legfontosabbak.

2. táblázat

A kis és közepes aktivitású hulladékok főbb radioizotópjai a paksi atomerőműben

Izotóp	Felezési idő (év)
^{58}Co	0,2
^{110}Ag	0,7
^{54}Mn	0,9
^{134}Cs	2,1
^{55}Fe	2,7
^{60}Co	5,3
^3H	12,3
^{90}Sr	28,6
^{137}Cs	30,2
(^{238}Pu)	(87,8)

Normális üzemmenet esetén a kiégett fűtőelemek jelentik az egyedüli nagy aktivitású hulladékot. Évente 400–440 kiégett fűtőelemet cserélnek le. Ezek a korábbiakban említett átmeneti tárolóba kerülnek. Államközi szerződés keretében a volt Szovjetunió, ill. a mai Oroszország eddig költségtérítés ellenében átvette a kiégett fűtőelemeket. 1997 végéig 1500 fűtőelemet szállítottak ki. Könnyen lehetséges, hogy ez a kiszállítás a jövőben nem lesz folytatható, ezért a nagy aktivitású hulladékok elhelyezéséről idehaza kell gondoskodni.

2020 után fokozatosan megindul az atomerőmű blokkjainak leszerelése. Ennek időrendje a lehetséges technikai fejlődéstől függően még bizonytalan. Annyi biztos, hogy a fent leírt üzemviteli hulladékokon felül ebben az időszakban jelentős mennyiségű leszerelési hulladék elhelyezéséről kell majd gondoskodni. Az atomerőmű illetékes szakembereitől kapott tájékoztatás szerint a leszerelés során 24–26 000 m³ kis és közepes aktivitású, továbbá 2000–2200 m³ nagy aktivitású hulladék elhelyezését kell biztosítani.

A paksi atomerőmű kiégett fűtőelemeinek főbb radioizotópjait a 3. táblázatban mutatom be. Közülük a plutónium, a jód és a nikkell izotópjai jelentik az élővilágra a legnagyobb veszélyt. Ezeknek az izotópoknak a felezési ideje több százezer évig terjedhet.

3. táblázat

A kiégett fűtőelemek radionuklid-összetétele a paksi atomerőműben

^{234,235,238} U	uránium
^{238,239,240} Pu	plutónium
^{241,243} Am	americium
²³⁷ Np	neptunium
¹⁴ C	szén
³⁶ Cl	klór
⁶³ Ni	nikkel
¹²⁹ I	jód
^{134,137} Cs	céziium
⁹⁰ Sr	stroncium
³ H	hidrogén (trícium)

A radioaktív hulladék hazai elhelyezésének törvényi és szervezeti keretei

A magyar törvényhozás 1996. december 10-i ülésén elfogadta az atomenergiáról szóló 1996/CXVI. számú törvényt. A törvény „Központi Nukleáris Pénzügyi Alap” létrehozását írja elő a radioaktív hulladékok kezelésének, továbbá a tárolóhelyek kutatásának, létesítésének és üzemelésének költségfedezetére. Ez az alap fedezi az atomerőmű leszerelési költségeit is. Az alap kezelője az Országos Atomenergia Hivatal (továbbiakban OAH). A befizetést az erőmű által

előállított villamos energia árában érvényesítik. A törvény értelmében 1998. július 1-vel létrejött a Radioaktív Hulladékokat Kezelő Közhasznú Társaság (továbbiakban RHKKT). Feladata a hulladékkezelés, a hulladéktárolók kutatása, létesítése, üzemeltetése, továbbá az atomerőmű leszerelésének irányítása. Említést érdemel még, hogy a hulladéktárolók földtani követelményrendszerét 1997-ben miniszteri rendelettel határozták meg. Ennek értelmében a földtani követelményrendszerrel kapcsolatos kérdésekben a Magyar Geológiai Szolgálat szakhatósági hozzájárulása szükséges.

A hulladékelhelyezés kutatási terveit és jelentéseit az RHKKT által létrehozott 8 tagú szakértői bizottság véleményezi. Döntéshozatalra három lépcsőben kerül sor: előbb a minisztériumok megbízottaiból álló szakbizottság, majd az Országos Atomenergia Bizottság és végül a Parlament szintjén.

A hazai kis és közepes aktivitású hulladékok tárolóhelyének kutatása

Hazánkban e téren az érdemi kutatások 1976-ban kezdődtek el, amikor az ETV-ERŐTERV Intézet 18 potenciális telephelyre vonatkozóan végzett áttekintő vizsgálatokat. Ezek eredményeként *Püspökszilágyon* felszíni betonmencés tárolót létesítettek korlátozott befogadóképességgel. Máiig ez a tároló fogadja a nem atomerőművi (tudományos, ipari és orvosi) kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékokat. 1983 és 1996 között hatósági engedéllyel a pakisi atomerőmű is szállított ide kis aktivitású szilárd hulladékot.

A folytatódó országos kutatások során előbb *Magyaregregy* térsége merült fel, de ezt a lehetőséget a Baranya Megyei Tanács 1983-ban elvetette. Ezután az ETV-ERŐTERV *Ófalu* térségét javasolta kutatásra. 1984 és 1988 között számos vállalat és intézmény bevonásával földtani és geofizikai kutatások folytak itt felszíni tároló létesítése érdekében. A felvetődött ellenvélemények miatt ún. független szakértői bizottság alakult, amely 1988-ban szakmai érvekre hivatkozva elvetette a kutatások folytatását. Számos tárgyalás, vita és ellentmondó szakértői vélemény elhangzása után az akkori Népjóléti Minisztérium 1990-ben véglegesen elvetette az ófalui felszíni hulladéktároló tervét. Személyes véleményem szerint még ez a sikertelenül végződött kutatás is számos hasznos földtani, geofizikai, kutatásszervezési és tájékoztatási tapasztalatot hozott, amelyeket a későbbi kutatásoknál hasznosítani lehetett.

Az OAH kezdeményezésére 1992-ben több minisztérium és országos hatóság részvételével ún. „nemzeti projekt” indult a kis és közepes aktivitású hulladékok végleges elhelyezésére. A projektet két szakaszban kívánták megvalósítani: az első szakaszban a telephelyek kiválasztása volt a cél, a másodikban a

telephelyjellemezést kellett megvalósítani, majd a kormány és a parlament pozitív döntése esetén a tároló megépítésére kerülhet sor. Az atomenergiáról szóló törvény elfogadásáig a Paksi Atomerőmű Rt. volt a projekt megvalósításáért felelős szervezet. A földtudományi kutatások koordinálásával a Földtani Intézetet (továbbiakban MÁFI) bízták meg. A műszaki jellegű kutatások, a biztonsági elemzések és a létesítmény tervezésével kapcsolatos kérdések koordinálásával az ETV-ERŐTERV-et bízták meg.

A kutatások első lépéseként 1993-ban a Paksi Atomerőmű Rt. és az ETV-ERŐTERV *Komplex stratégia* címmel többkötetes tanulmányt készített, amelyben a hulladékkezelés és -csökkentés (pl. tömörítés) és a hulladéktárolók kutatásának alapelveit írták le. Ugyanebben az évben a szakértői bizottság közreműködésével *szakmai követelményrendszert* dolgoztak ki a tárolóhelyek kiválasztásához. Kisebb kiegészítésekkel ez a követelményrendszer máig érvényben van. Ennek figyelembevételével a MÁFI irányításával 1993–1994-ben 1:500 000 léptékű szakirodalmi felmérés készült az ország egész területéről. E munka első szakasza negatív szűrés volt. Ennek során politikai megfontolásból kimaradt az országhatár mentén egy 30 km széles sáv. Kimaradtak továbbá a lakott területek, a történelmi emlékhelyek, az üdülőkörzetek, a nemzeti parkok és a tájvédelmi körzetek, a működő és a távlati ivóvízbázisok, a tavak, folyók és víztárolók, valamint az árvízzel vagy belvízzel veszélyeztetett területek.

Kimaradtak az ipari és a katonai létesítmények, a bányák, a fontosabb vasutak, közutak, hidak és a repülőterek, továbbá a kőolaj- és földgázvezetékek. Szakmai okokból kimaradtak a felszíni és a felszín közeli karszterületek, a gyógyforrások, a tőzeglápok és a földcsuszamlásos területek. E kizáró szűrés eredményeként az ország 93 000 km²-nyi területéből 6000 km² maradt felszíni és 23 000 km² felszín alatti hulladékelfhelyezésre potenciálisan alkalmas.

Ezután következett a pozitív tényezők számbavétele és rangsorolása. Ennek alapján *objektumokat*, továbbkutatásra földtanilag alkalmasnak látszó térrészeket különböztettek meg. Felszíni elhelyezésre főleg széles és lapos dombtetőket választottak ki. A felszín alatti elhelyezésnél a kedvező hidrogeológiai helyzet volt a fő szempont. Az 1. ábrán láthatók az ország területén így kijelölt kedvező objektumok, külön a felszíniek és a felszín alattiak. A MÁFI 1994-ben erről a felmérésről jelentésben számolt be.

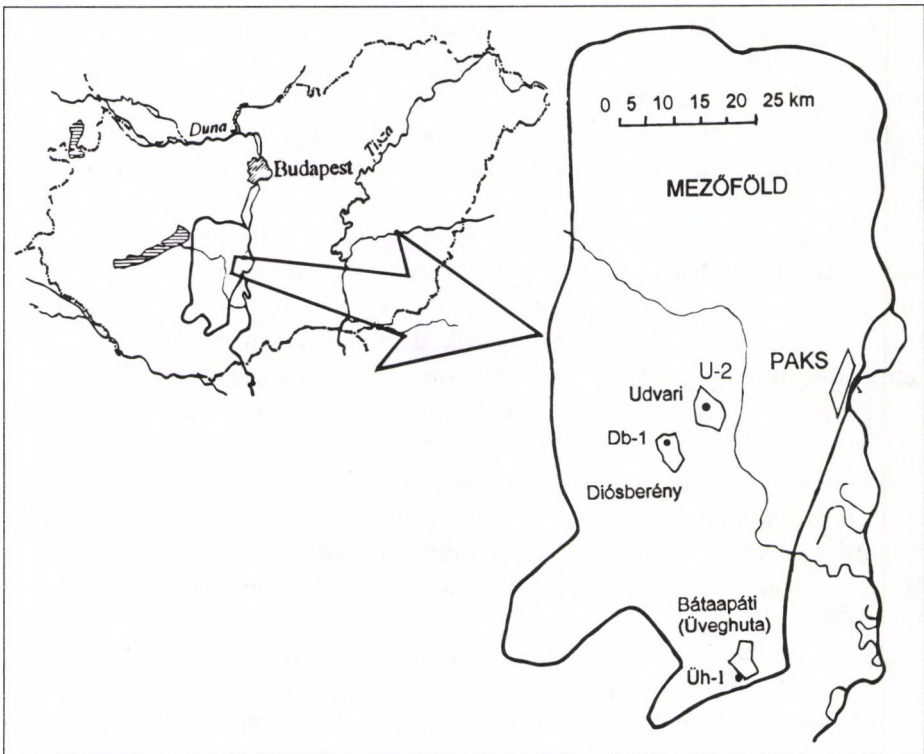
A szakértői bizottság véleményének meghallgatása után az illetékes hatóságok Pakstól nyugatra egy kb. 5000 km² kiterjedésű területet jelöltek ki részletesebb, 1:100 000 léptékű szakirodalmi felmérésre. E terület körvonala az 1/B ábrán látható. A döntés alapjául egyrészt az szolgált, hogy itt számos felszíni és felszín alatti potenciális objektum található, másrészt az, hogy ez a terület



1. ábra. Az országos szakirodalmi felmérés eredményei (MÁFI, 1996): a) felszíni elhelyezésre perspektivikus objektumok; b) felszín alatti elhelyezésre perspektivikus objektumok

a paksi atomerőmű közelében helyezkedik el, tehát a hulladékot csak kis távolságra kell majd szállítani.

E területen a MÁFI 1994–95-ben pontosította az első ütem eredményeit, pl. minden település körül 1 km széles védősávot vettek fel. A területen végül is 128 továbbkutatásra alkalmas felszíni és 193 felszín alatti potenciális objektumot jelöltek ki, és ezeket rangsorolták. Ezekről a Paksi Atomerőmű Rt. kikérte az érintett lakosság véleményét. Sajnos a válaszok többnyire elutasítóak voltak, és így összesen 7 felszíni és 16 felszín alatti objektum maradt, amelyen a lakosság hozzájárulásával a kutatások folytatására volt lehetőség. Ezek közül az illetékes hatóság három felszíni objektumot választott ki Udvari, Diósberény és Németkér térségében. Németkér lakossága a hozzájárulást utólag visszavonta, így ez az objektum kiesett. A diósberényi és az udvari objektum felső pliocén és negyedkori üledékekből álló dombtetőkön helyezkedik el. Felszín alatti



2. ábra. Az 1:100 000 léptékű szakirodalmi felmérés területe a lakosság által elfogadott, a továbbkutatásra alkalmas objektumokkal és a fúrások helyével (MÁFI, 1996)

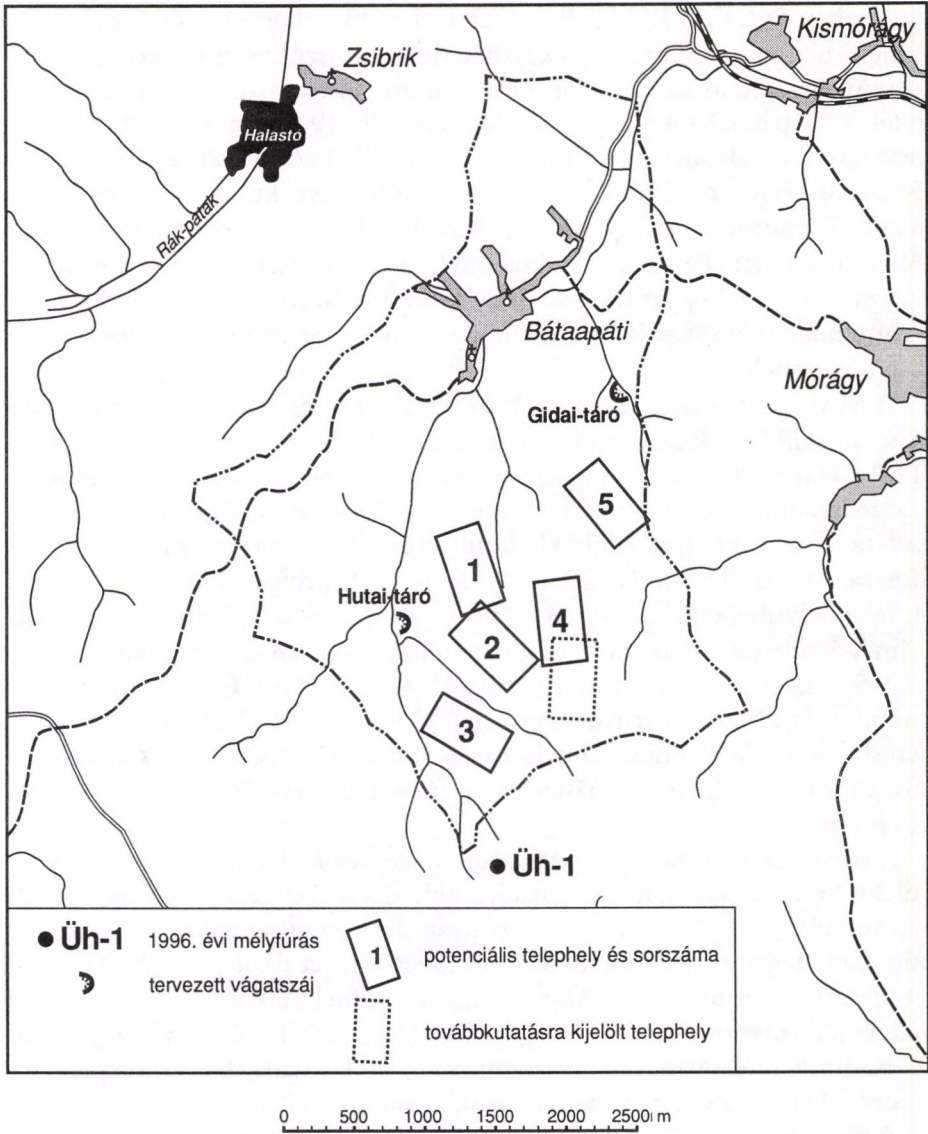
kutatásra a Mórággyi Gránitrög területén az üveghutai elhagyott falu térségét választották ki Bátaapáti község közigazgatási területén. Ezeknek az objektumoknak a helyét láthatjuk a 2. ábrán.

1995-ben e három objektumon folytatódtak a kutatások 1:50 000 léptékben. Földtani térképezés folyt, felmérték a vízzáró és s vízvezető képződmények helyzetét, a forrásokat és a felszíni vízfolyásokat. Geomorfológiai, gazdaságföldrajzi és ökológiai felmérések is készültek. Számos felszíni geofizikai mérést végeztek, és meghatározták a talajvíztükör helyzetét. A csapadék és a párolgás figyelembevételével számítógépes talajvíz-áramlási modelleket készítettek. Ezt követően a három objektum mindegyikén, a földtanilag legalkalmasabbnak látszó helyen egy-egy magfúrás mélyült. Az udvari fúrás 97 méter lösz és 53 méter tarka agyag alatt 150 méter mélységben érte el a felső pannon üledékeket, és azokban 170 méter mélységig haladt. A diósberényi fúrás 59 méter lösz és 4 méter tarka agyag alatt 63 méter mélységben érte el a felső pannon üledékeket, és azokban 150 méter mélységig haladt. Végül Bátaapátitól délre az Üh-1 jelű fúrás 40 méter negyedkori lösz és tarka agyag alatt érte el a gránitot. Ennek legfelső 18 métere laza és mállott volt, majd üde, kemény gránit következett. Az eredetileg 500 méteresre tervezett fúrás sajnos csak 364,5 métert ért el egy 295 métertől kezdődő erősen összetöredezett zóna műszaki nehézségei miatt.

Mindhárom fúrásban részletes rétegtani, kőzettani, hidrogeológiai és lyukgeofizikai vizsgálatok készültek. Ezek alapján számítógépes talajvíz-áramlási modelleket készítettek és elérési időket határoztak meg. Mindhárom objektum továbbkutatásra alkalmasnak látszik, de a nemzeti projekt irányító testülete az üveghutai objektum mellett döntött a gránit kedvezőbb tulajdonságai és a kedvezőbb hidrogeológiai modell miatt. Udvari lett az első számú tartalék terület.

Mindezen kutatások eredményeiről a MÁFI számos szerző részvételével magyar és angol nyelven tanulmánykötetet jelentetett meg. Ebből külön említést érdemel a térség hidrogeológiai jellemzése (Balla, Tóth, Könczölné, 1997) és a gránitkomplexum korszerű ásványtani és kőzettani vizsgálata (Buda, Pus-kás 1997).

Az üveghutai objektum a korábbi ófalui kutatási területtől légvonalban mindössze 8 km távolságra van. Felvetődhet a kérdés: helyes-e egy elvetett kutatási terület közelében folytatni a kutatásokat? Először is Ófalunál felszíni tárolót akartak létesíteni, Üveghutánál pedig gránitban elhelyezendő, felszín alatti tárolóról van szó. A két objektumot az ún. „Mecsek-alja szerkezeti vonal” választja el egymástól, és e vonal két oldalán teljesen más a földtani és tektonikai felépítés. Ezért ezeket az aggályokat megalapozatlanoknak tartom.



3. ábra. A MÁFI által javasolt öt potenciális telephely elhelyezkedése. Pontozott vonallal jelölve a továbbkutatásra kijelölt területrészt (MÁFI, 1997)

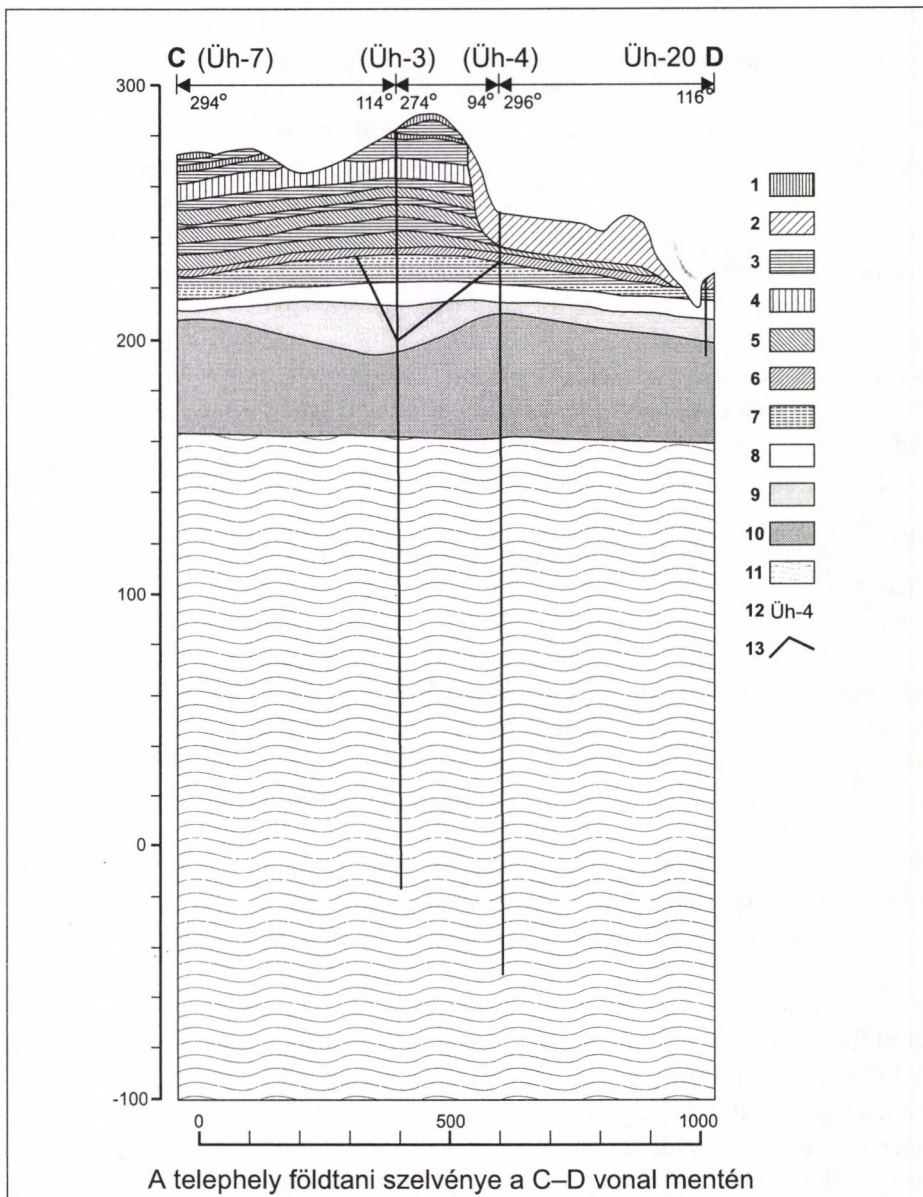
Közben az ETV-ERŐTERV ún. „telephelyfüggetlen” és „létesítményfüggetlen” biztonsági elemzéseket készített determinisztikus módszerrel, külön a felszíni és a felszín alatti elhelyezésre. E munka elsősorban módszertani ismeretek és tapasztalatok megszerzésére irányult. 1996-ban több alvállalkozó bevonásával „telephelyspecifikus” biztonsági elemzést készítettek Üveghuta és Udvari térségére. Ezek a számítások is determinisztikus módszerrel készültek, és a lezárást követő 10 000 évre terjedtek ki. Ezzel egy időben a Golder Associates nevű cég sztochasztikus módszerrel készített biztonsági elemzést ugyanezekre az objektumokra. A mindkét módszerrel készült számítások áttanulmányozása alapján az a véleményem, hogy ezeket még jelentős bizonytalanság terheli.

A MÁFI 1997 márciusára tervet készített az Üveghuta térségében kialakítható telephelyek kiválasztására. A telephelyek alapterületét az ETV-ERŐTERV 600 x 300 méterben határozta meg. Háromdimenziós talajvízáramlási modellszámítások, valamint tektonikai megfontolások alapján a MÁFI öt potenciális telephelyet jelölt ki dombgerinceken, mert szerinte itt a leghosszabbak az elérési idők (3. ábra). A nemzeti projekt irányító testülete a 4. telephely mellett döntött, tartaléknak pedig az 5. telephelyet választották. Mindkét telephelyet az adott dombtető tengelyvonalához igazították.

1997 őszén a 4. telephelyen egymástól 200–200 méter távolságra négy fúrás indult, melyek 1998 februárjára be is fejeződtek. Az Üh-2 jelű fúrást 500 méteresre tervezték, de műszaki nehézségek miatt 381,9 méter mélységben, gránitban le kellett állítani. A másik három fúrás elérte az előírt 300 méteres mélységet.

A fúrások rétegsora nagy vonalakban megegyezik az Üh-1 fúrásával: legfelül 30–40 méter vastag lösz található, amely alatt a Tengelici Tarkaagyag Formáció következik 2–7 méter vastagságban. Ez a kontinentális agyag minden fúrásban megvolt, és a dombokon összefüggő réteget alkot. Az eddig elvégzett öt vizsgálat szerint agyagásványokban, főleg szmektitekben gazdag, és ezért feltehetően jó izotópmegkötő tulajdonságokkal rendelkezik. A tarkaagyag alatt előbb 10–20 méter vastag granitoid murva, majd kémiailag bontott, repedezett granitoid következik, majd ez alatt az üde granitoid (4. ábra).

A fúrásokban igen sokféle földtani, ásványtani, kőzettani, tektonikai, hidrogeológiai és geofizikai vizsgálatot végeztek, melyek közül kiemelést érdemel a lyukfaltelevízió és a saját fejlesztésű számítógépes magszkenner alkalmazása. Ismételt packeres méréseket végeztek a talajvízáramlás meghatározására. A fúrások között felszíni geofizikai szelvényeket fektettek. A fúrások közötti tér mélységi átvilágítására szeizmikus sebesség- és abszorpciós tomográfiai méréseket végeztek. Az áramlási kép tisztázására a dombtetőkön további három, a



4. ábra. Földtani szelvény a 4. számú telephelyen át (MÁFI, 1998). Jelmagyarázat: 1 – erdőtalaj, 2 – csuszamlásos üledék, 3 – lösz, 4 – fosszilis erdőtalaj, 5 – fosszilis erdőtalaj, 6 – tarkaagyag, 7 – gránitmurva, 8 – széteső gránit, 9 – erősen mállott gránit, 10 – gyengén mállott gránit, 11 – felszíni hatásoktól mentes gránit, 12 – kutatófúrás, 13 – vető

völgyekben pedig öt magfúrást végeztek 20, ill. 80 méter mélységig. Az áramlási modell pontosítására végül abszolút vízkör-meghatározások történtek.

1998. szeptember 30-án a MÁFI benyújtotta az eddigi kutatás eredményeit összefoglaló *zárójelentését*. A jelentés célja a telephely alkalmasságának elbírálása. Személyes véleményem szerint a telephely a kutatások folytatására és befejezésére alkalmas, mert az értékelés során nem adódott olyan körülmény, amely a telephely alkalmatlanságáról tanúskodna. Bizonytalan még a tektonikai modell, mert a fúrások távolsága a hatástávolságot meghaladja, továbbá mert a mórágyi gránitban nem sikerült eddig geofizikai módszerekkel a tektonikai felépítést egyértelműen tisztázni. Csupán annyit sikerült megállapítani, hogy a gránitot átszelő törésvonalak a fiatal fedőrétegekre nem terjednek át. Azt sem sikerült tisztázni – a rossz magkihozatal miatt –, hogy a több tíz méter széles zúzott zónákat csak kőzetzúzalék tölti ki, vagy azt agyag is cementálja. Mindezek miatt a kialakított hidrogeológiai modellt is még sok bizonytalanság terheli.

A szakértői bizottság 1998. decemberi ülésén a zárójelentést a szükséges kiegészítések és módosítások elvégzése után elfogadásra ajánlotta. Amennyiben a felsőbb hatóságok ezt a javaslatot elfogadják, úgy elkészülhet a földtudományi kutatás befejező szakasza. Ennek célja a befogadó kőzet izotópmegkötő képességének, a telephely hidrogeológiai és tektonikai felépítésének, valamint kőzetmechanikai tulajdonságainak kellő részletességű megismerése, továbbá a biztonsági elemzés előkészítése. Az a véleményem, hogy *a telephely részletes, hálózatos felfúrása súlyosan veszélyeztetné a leendő hulladéktároló biztonságát*. Ezért egy jóval pontosabb és részletesebb ismeretszerzést biztosító *kutatóvágot* kihajtását javaslom, oly módon, hogy az összhangban legyen a kialakítandó bányászati létesítmények térbeli elhelyezésével.

A földtudományi kutatás befejező lépése lesz a *biztonsági elemzés*. Amennyiben ez pozitív eredménnyel zárul, úgy megkezdődhet a hosszadalmasnak ígérkező hatósági engedélyezési eljárás, melyben a végső szót a parlament mondja ki. Ezután a telephely ipari-bányászati kutatása, tervezése és megépítése következik. Amennyiben a biztonsági elemzés negatív eredménnyel zárul, vagy a parlamenti jóváhagyás nem történik meg, úgy a gránitmasszívum területén új telephelyet kell kijelölni, vagy a gránitot felhagyva, az udvari objektumon kell a kutatásokat folytatni.

Végül szólnom kell még arról, hogy a gránitmasszívum tektonikai stabilitásának helyes megítélése szempontjából igen fontos az ún. „Mecsek-alja tektonikai vonal” lefutásának és korának minél pontosabb megismerése. Ezért a Paksi Atomerőmű Rt. megbízásából 1997-ben a GEOMEGA Kft. Horváth Ferenc geofizikus szakmai irányításával egy- és többcsatornás, nagy felbontású

szeizmikus méréseket végzett a Dunán, továbbá jelentésben értékelte a Keleti-Mecsek, valamint a Szekszárdi-dombvidék neogén tektonikai fejlődés-menetét. Jelentésük szerint nincsenek e területen a felszínig hatoló, jelenleg is aktív törésvonalak, bár a pleisztocénban még voltak tektonikai mozgások. *In situ* feszültségméréseik szerint e területen ma is É–D és ÉÉK–DDNY irányú kompressziós jellegű feszültségek mutathatók ki. Ezt a körülményt a tároló létesítéskor figyelembe kell venni.

A hazai nagy aktivitású hulladékok tárolóhelyének kutatása

A nagy aktivitású hulladékok kutatása a fentiekől eltérően alakult. Meghatározó volt, hogy a Mecsek hegységben az 1950-es évek óta uránércbányászat folyt a felső perm korú Kővágószőlősi Homokkő Formációból. A bányászatot kiegészítő földtani kutatás az egész perm időszaki rétegösszlet jobb megismeréséhez vezetett. A Kővágószőlősi Homokkő Formáció fekélyét képező Bodai Aleurolit Formációt (továbbiakban BAF) is több fúrással feltárták, és felismerték, hogy ez a képződmény mind a toxikus, mind a radioaktív hulladékok tárolására alkalmas. Ezért a Mecseki Ércbányászati Vállalat (továbbiakban MÉV) 1989-ben javaslatot készített a BAF feltárására az uránércbánya 1050 m mélyen levő szintjéből vízszintesen kihajtott kutatóvágat segítségével. A MÉV ezután saját költségén egy 750 méter hosszú vágatot hajtott ki a BAF irányába. 1991-ben pénzügyi nehézségek miatt a vágathajtást meg kellett szakítani, de a nemzeti projekt támogatásával 1993-ban folytatódott a vágat kihajtása. 1994-ben egy meredek törésvonal harántolása után elérték a formációt. A vágatot tovább hajtották, és belőle több irányba fúrásokat is végeztek. A vágatfalból és a fúrómagokból rendszeresen mintákat vettek, továbbá *in situ* és laboratóriumi vizsgálatokat végeztek. Ezek eredményeiről 1995-ben a MÉV jelentést készített.

A kutatások megnövekedett volumene és egyre sokrétűbb tartalma miatt az OAH 1995-ben kezdeményezte önálló kutatási program létrehozását a nagy aktivitású hulladékok elhelyezésére. Ennek kapcsán még ebben az évben hároméves *rövid távú kutatási programot* készített a MÉV az 1995–1998 közötti időszakra (Kovács L., 1997). A program irányítására 1996-ban programirányító testület (továbbiakban PIT) alakult, amelyben több minisztérium, országos hatóság és a Tudományos Akadémia megbízottjai vesznek részt. 1998. július 1-je óta ezeket a kutatásokat is az RHKKT irányítja. A PIT-program dokumentuma szerint a kutatásokat két ütemben kívánják megvalósítani. Az első ütem a *rövid távú kutatási program* zárójelentésével fejeződik be, amit 1998. november 30-ig kellett benyújtani. Ebben a BAF tovább kutatásra való alkalmasságát kel-

lett bizonyítani, továbbá egy az egész országra kiterjedő szakirodalmi felmérést kellett készíteni. A második ütemben ki kell jelölni a tárolóhelyet és azt a szükséges mértékben meg kell kutatni. Közben a mélyszinten fenn kell tartani a kutatólaboratóriumot (URL). A tárolóhelyen bányászati eszközökkel egy újabb mélységi laboratóriumot kell létesíteni, és ebből folytatódnak majd a tároló végleges bányászati létesítményei. A tároló megépítése véleményem szerint 2–4 évet vehet igénybe és 2035–2040-re készülhet el.

A rövid távú kutatási program négy időszaki részjelentése, valamint zárójelentése alapján a BAF-ról szerzett eddigi ismereteinket az alábbiakban lehet összefoglalni:

A BAF felső perm korú, tehát mintegy 245–255 millió éves képződmény. Fúrásokkal igazolt térbeli kiterjedése kb. 150 km², ebből Boda község közelében 14 km² területen a felszínen van. Felszíni fúrásokkal igazolt vastagsága 700–900 méter. A formáció egy kelet felé dőlő antiklinális északi szárnyán helyezkedik el, ezért van Boda térségében a felszínen és az uránércbánya térségében 1000–1200 méter mélyen a felszín alatt. Ezt a helyzetét szemlélteti a Mecsekérc Rt. által készített földtani szelvény (5. ábra).

Sokoldalú szedimentológiai vizsgálatok szerint a BAF félsivatagi-sivatagi klímán felhalmozódott sekélytavi üledék (Hámos, Máthé, Majoros, 1996). A leülepedést szokatlanul erős diagenetikus ásványképződés, nevezetesen albitizálás követte. A BAF fektíje durva szemű homokkő és konglomerátumból álló folyóvízi üledék, a Cserdi Formáció. A BAF fedője szintén folyóvízi homokkő és konglomerátum, amely felső részén uránérctelepeket tartalmaz. Ez a Kővágószőlősi Formáció (Hámos et al., 1966.). Maga a BAF öt kőzetfajta váltakozásából áll. Ezek: albitos agyagkő > albitos aleuritós agyagkő > albitos aleurolit > albitos dolomit > albitolit. Ezek a kőzetfajták egymással váltakozó 2–20 cm vastag rétegeket alkotnak.

A nagyszámú ásványtani vizsgálat (vékonycsiszolat, diffraktometria, DTA és termogravimetria, pásztázó elektronmikroszkópia, elektron-mikroszkop) szerint a BAF egésze az alábbi ásványtani összetétellel jellemezhető:

plagioklász (főként albit)	25–65%
kvarc	5–35%
kalcit, dolomit	10–60%
hematit	2–12%
agyagásványok	5–50%

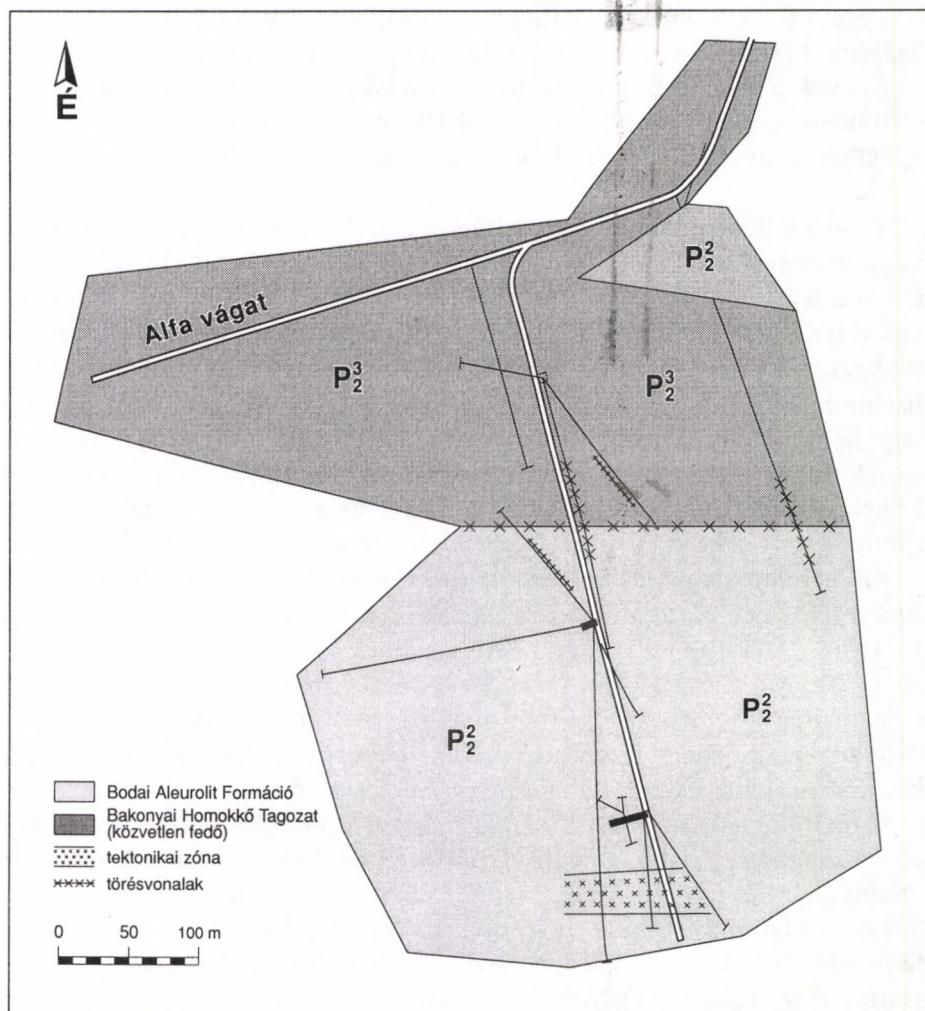
Az agyagásványok között leggyakoribb az illit-szericit, ezt követi a klorit, majd az illit-klorit és illit-szmektit kevert rácsszerkezetek, végül a kaolinit. A BAF felszíni és felszín közeli részein a mállás eredményeként montmorillonitot is kimutattak a vizsgálatok. Az MTA Geokémiai Kutatólaboratóriumában

elvégzett ásványtani vizsgálatok szerint az illit és a klorit kristályossági indexei a diagenézis és a kis hőmérsékletű anchimetamorfózis határzónájába esnek.

A képződmény túlnyomóan vörösbarna színű, kemény kőzet, melynek rétegzettsége szabad szemmel is jól felismerhető. A legkülönbözőbb irányokban 1–30 mm vastag repedések és hasadékok járók át, melyeket sárgásfehér, kemény anyag tölt ki. Az ásványtani vizsgálatok szerint a repedéseket a következő ásványok töltik ki: kalcit, anhidrit, gipsz, kvarc, dolomit, albit, barit, cölesztin és igen kis mennyiségben kaolinit, pirit, kalkopirit és galenit. Az ásványok kifejlődése és összetétele alacsony hőmérsékletű, felszálló hidrotermákat valószínűsít. Ezt erősítették meg a repedéskitöltéseken végzett K-Ar abszolút kormeghatározások, melyek szerint a repedéskitöltések kora 80 ± 3 millió év, ami felső krétának felel meg. Tehát a repedéskitöltések a képződmény alapanyagánál jóval fiatalabbak! A kőzetet alkotó ásványokat egyébként genetikai szempontból is vizsgálták, és megállapították, hogy az ásványoknak csak 30-50%-a törmelékes eredetű, 40-60%-a diagenetikus. Egyes helyeken a diagenetikus albit mennyisége még ennél is több, és ilyenkor indokolt a kőzetet albitolitnak nevezni. Ennek a diagenetikus ásványkitöltésnek köszönhető a BAF oly kedvező tulajdonságai a hulladéktárolás szempontjából.

A BAF tehát egy egész sor igen kedvező tulajdonsággal rendelkezik, amelyek közül ki kell emelni a képződmény rossz vízvezető képességét ($k = 10^{-8} - 10^{-12}$ m/s) és kis transzmisszivitását ($T = 10^{-11} - 10^{-8}$ m²/s) (Csicsák, 1996). Igen kedvező továbbá a képződmény erőteljes izotópmegkötő képessége, amit elsősorban agyagásványainak, továbbá rendkívül finom szemcsés hematittartalmának köszönhet. A BAF természetes radioaktivitása is kicsiny: 200 Bq/kg, átlagos fémurántartalma pedig csak 2–11 ppm. Öszehasonlításul szolgálhat, hogy a Kővágószőlősi Formáció uránérclepei átlagosan 1117 ppm fémuránt tartalmaznak – a földtani vagyokra vonatkoztatva. A BAF átlagos thórium-tartalma 3–20 ppm, káliumtartalma pedig illit-szericit-tartalmától függően 0,8–5%.

Részletesen vizsgálták továbbá a BAF geotermikus tulajdonságait. A felszíntől a kutatóvágatig terjedő mélységszakaszban a geotermikus gradiens 22 m/°C. Ennek megfelelően a kutatóvágatot körülvevő kőzet hőmérséklete kerekén 50 °C. Nyilvánvaló, hogy a nagy aktivitású hulladékok rendkívül nagy hőteljesítménye miatt nem szabad ilyen közethőmérsékleten végleges tárolót elhelyezni. Szerencsére a BAF kibúvási területén a nemzetközileg javasolt 400–800 méter mélységben a fenténél lényegesen kisebb közethőmérsékletre lehet számítani. Ezeknek a megfontolásoknak a figyelembevételével a rövid távú kutatási program keretében a BAF kibúvási területein felszíni kutatások kezdődtek. A topográfiai térkép pontosítására légi felvétel készült, majd 26 km²



6. ábra. A Bodai Aleurolit Formációt feltárt kutatóvágat és mélyszinti fúrások helyszínrajza (Mecsekérc Környezetvédelmi Rt., 1997)

területen 1:4000 méretarányban új földtani térképet készítettek. Ennek során minden egyes természetes és mesterséges feltárást leírtak, lefényképeztek, megmintáztak és részletesen dokumentálták. Hat magfúrás készült a BAF mállási zónájának megismerésére. (Ne feledjük, hogy a mállási zóna agyag-ásványai kiegészítő földtani gátat képezhetnek!) A neotektonikai mozgások felismerése céljából geomorfológiai felvétel készült, amit GPS-pontok telepí-

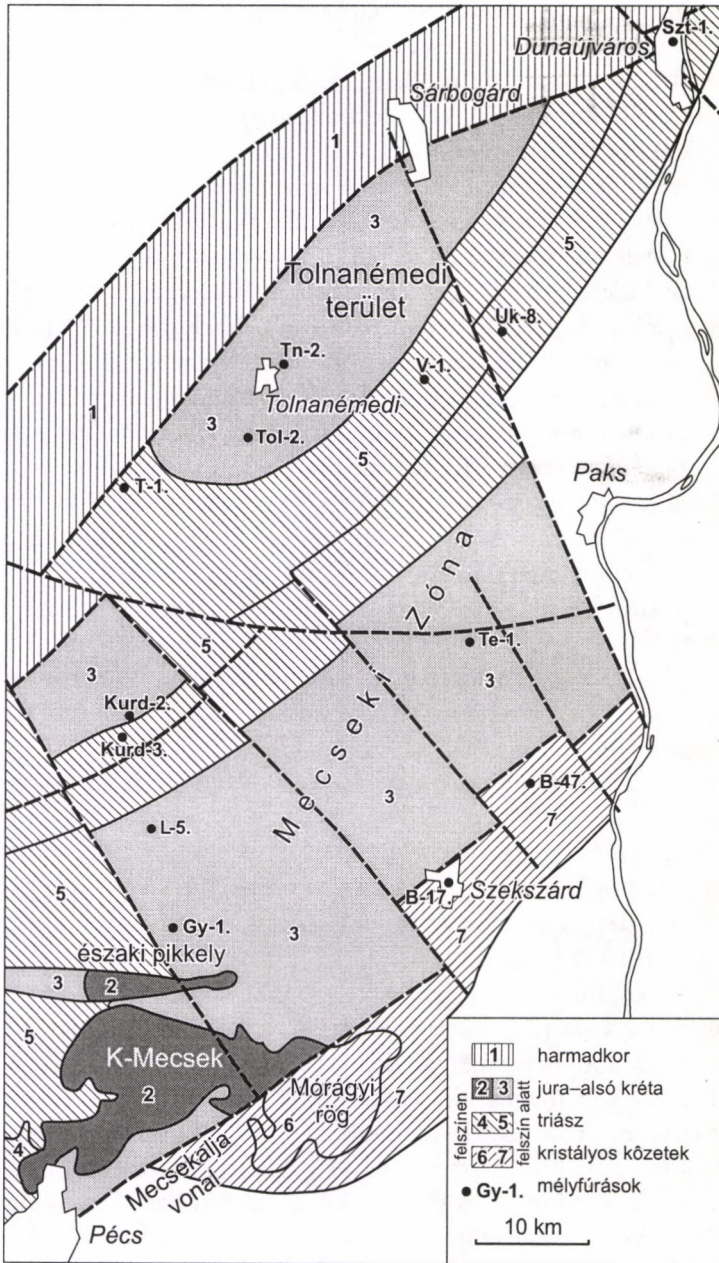
tése egészített ki – a tényleges jelenkori mozgások nagy pontosságú meghatározására. Néhány fontosabb helyen felszíni geofizikai méréseket végeztek, és rögzítették a felszínre kifutó tektonikai zónákat. Végül felmérték a felszíni vízrendszert, és egy állandósított csapadék- és vízmegfigyelő mérőrendszert építettek ki, amit a felszíni vizek kémiai elemzése, pH- és Eh-vizsgálata egészített ki.

Mind a felszínen, mind a mélyszínen a kutatások kiemelt részét képezték a *tektonikai vizsgálatok*. A több évtizedes uránércbányászat során sikerült a térség tektonikai felépítését tisztázni, most a helyi tektonikai vonalak és zónák pontosítása volt a feladat. Ezek közül néhányat a földtani szelvényen (5. ábra) is láthatunk. A mélyszínen sikerült egy nagyobb tektonikai zónát vágattal elérni és harántolni (6. ábra). Ennek során kiderült, hogy e zóna hidrogeológiai tulajdonságai nem rosszabbak a környező, nem diszlokált kőzeténél. Ez rendkívül kedvező körülmény, és remény van arra, hogy ez a tároló végleges helyén is így lesz. Ennek ellenére törekedni kell arra, hogy a végleges tárolóhely tektonikailag zavartalan térrészbe kerüljön, de legalábbis ne szeljék át vastag tektonikus zónák.

Külön pontot képeztek az igen részletes és sokoldalú *kőzetmechanikai vizsgálatok*, melyeket a vágatban és az onnan készített fúrásokban végeztek (Kovács L., 1996, 1997). Kiderült, hogy a BAF kőzetmechanikai tulajdonságai kedvezőek, jók a fő szilárdságtani paraméterek és a bányaműszaki tulajdonságok (állékonyság, jöveszthetőség, a robbantás hatásai stb.), továbbá az, hogy a kőzet nem duzzad. Az eddigi vizsgálatok eredményei azt valószínűsítik, hogy ezek a kedvező tulajdonságok hosszú időn át stabilok maradnak.

Már említettem, hogy a mélyszínen végzett *hidrogeológiai vizsgálatok* kedvező eredménnyel jártak. Az eddig elkészült háromdimenziós áramlási modell szerint a tároló helye beszivárgási területen van, tehát a leszálló vízmozgás a jellemző. Hangsúlyozni kell, hogy ezeket a számításokat még számos bizonytalanság terheli. Ugyanakkor a mélyszínen vett vízminták radiokarbon-módszerrel végzett abszolút kormeghatározása megerősíti a rendkívül lassú vízmozgást és az igen hosszú elérési időket (20 000–25 000 év). Megerősítik ezt az eredményt a képződményből vett vízminták H- és O-izotóp-vizsgálatai, melyek szerint e vízminták pleisztocénkorúak (Demény, Fórizs és Máthé 1996).

Az eddig elvégzett kutatások százezres nagyságrendű adatot szolgáltattak. Ezek tárolása, csoportosítása és feldolgozása hagyományos kézi úton igen lassú és körülményes lenne. Ezért tartom különösen fontosnak, hogy a Mecsekérc Rt. a DASY Döntés- és Rendszerelemző Kft. segítségével számítógépes adatbázist és térinformatikai rendszert épített ki, melynek feltöltése a kutatásokkal párhuzamosan folyik.



7. ábra. A Tolnanémedi térségében feltárt jurakorú foltosmárga összlet vázlatos helyszínrajza (MTA Földrajztudományi Kutató Intézet, 1997)

A mélyszínti munkák folytathatóságát kérdésessé tette az a kormányhatározat, amely az uránércbánya termelésének 1997. december 31-ével történő befejezését és a bánya bezárását rendelte el. A rendelet értelmében folynak a bánya bezárásának munkálatai. A fentiekben ismertetett mélyszínti kutatólétesítmény csak akkor tartható fent, ha biztosítják a bányától független működési feltételeit (pl. szállítás; energiaellátás, hűtés, szellőzés, vízkiemelés stb.). Ezért a Mecsekérc Rt. 1998-ban egy a bányától műszakilag függetlenített mélységi laboratórium kialakítására és fenntartására tett javaslatot. A javaslat megítélésére a szakértői bizottság homogenitás-számításokat végeztetett a Mecsekérc Rt.-vel, valamint a Miskolci Egyetem Bányamérnöki Karával. Az utóbbiak ún. költség/haszon számításokat is végeztek a további kutatási munkák optimális változatának kiválasztása érdekében. Ezek eredményei alapján a szakértői bizottság arra a véleményre jutott, hogy a mélységi laboratóriumot a jelenlegi kutatóvárat térségében célszerű megvalósítani és működtetni.

A rövid távú kutatási program keretében egy az egész ország területére kiterjedő szakirodalmi felmérésre is sor került, melyet az MTA Földrajztudományi Kutató Intézete koordinált, és amelyben számos külső szakértő vett részt. E felmérés célja annak tisztázása volt, hogy van-e az ország területén a BAF-nál kedvezőbb tulajdonságokkal rendelkező „befogadó” képződmény. Alapos előzetes mérlegelés és konzultációk alapján 12 képződményt választottak ki erre a feldolgozásra. Az 1997 novemberére elkészült jelentés szerint összesen alkalmasnak látszó képződményt találtak. Ezek a következők:

A) Az alsó és középső jurakorú *foltosmárga összlet*, amely Tolnanémedi térségben kb 50 km² kiterjedésben található, pannon korú fedő alatt mintegy 200 méter mélységben (7. ábra). Az összlet vastagsága eléri az 1000 métert, makroszkóposan homogénnek látszik, és kis vízvezető képességű. A képződmény anyagán eddig érdemi anyagvizsgálat nem készült, és a térség tektonikai felépítése sem tisztázott. A továbbkutatáshoz felszíni geofizikai mérésekre és legalább egy 500–600 méter mélységet elérő magfúrásra lesz szükség.

B) Az alsómiocén-korú *Gyulakeszi Riolitufa Formáció*, amely Nagydorog község közelében kb. 400 méter mélységben kiterjedt vulkáni kürtőt alkot (7. ábra). A formáció vastagsága meghaladja a 600 métert. Előnye a jó vízzáró képessége, nagy zeolitartalma (radioizotóp-megkötő képessége szükségszerűen nagy) és nyugodt tektonikai helyzete. Itt is felszíni geofizikai mérésekre, legalább egy 500–700 méteres mélyfúrásra és széles körű anyagvizsgálatra lesz szükség.

Mindkét helyszín nagy előnye, hogy a paksi atomerőműhöz viszonylag közel van, tehát a szállítási útvonal rövid lenne. A jelentés szerint további hat formáció részben alkalmasnak látszik nagy aktivitású hulladék mélységi elhelyezésére. Ezek közé tartozik az alsó oligocénkorú *Kiscelli Agyag Formáció*. Nagy

térbeli kiterjedése és vastagsága kedvező, viszont hátrányos a korróziókeltő nagy pirittartalma és a paksi atomerőműtől való *nagyobb távolsága*. Ebbe a csoportba tartozik még a Mórágyi Gránitkomplexum felszín alatti folytatása a Sárrét felé, a Gyódi Szerpentinít Formáció, a Görcsönyi Kristályospala Összet, a Gyűrűfüi Riolit Formáció és a Tari Dácittufa Formáció. A fennmaradó négy formációról kiderült, hogy nem alkalmasak nagy aktivitású hulladék tárolására.

Ez az igen alapos értékelés megerősítette azt a kiinduló véleményemet, hogy jelenlegi ismereteink szerint hazánk területén a BAF a legalkalmasabb nagy aktivitású hulladék mélységi elhelyezésére. Ennek ellenére szükségesnek tartom a két alkalmasnak látszó képződmény területén a kutatások folytatását, mert a nemzetközi tapasztalatok szerint nagy aktivitású hulladékok telephelykutatásánál mindig szükség van előzetesen megvizsgált alternatív telephelyekre. Ismereteim szerint ezért 1999-ben e két helyszínen a kutatások folytatódni fognak.

Külföldi tapasztalatok figyelembevétele

A radioaktív hulladékok elhelyezése céljából végzett kutatások költségessége és a rendkívül nagy biztonsági igények miatt törekednünk kell minden külföldi tapasztalat megismerésére és közülük azok hasznosítására, amelyek hazai földtani viszonyainkba beleilleszthetők. Idetartozik a külföldi szakirodalom rendszeres figyelése és feldolgozása, melyhez a MÁFI könyvtárának számítógépes szakirodalom-lekérdező rendszere nagy segítséget nyújt. Az Európai Unió és az OECD szakembereinek látogatásai, előadásai és helyszínbemutatásai is számos hasznos tapasztalattal jártak. Emellett számos geológus bevonásával külföldi tanulmányutakat szerveztek, és lehetővé tették hazai szakemberek részvételét nemzetközi konferenciákon.

A nagy aktivitású hulladékok tárolóhelyének kutatását hasznosan segítette a Paksi Atomerőmű Rt. és az Atomic Energy of Canada Ltd. (AECL) között 1993-ban létrejött együttműködési szerződés. Ennek keretében magyar geológusok tekinthették meg a cég kanadai (Pinawa) mélységi kutatólaboratóriumát, és kanadai szakemberek több látogatás keretében ismertették tapasztalataikat. A kis és közepes aktivitású hulladékok kutatásába közvetlenül bekapcsolódott az amerikai Golder Associates cég az üveghutai fúrások helyszíni szakmai felügyeletének biztosításával. Ugyancsak a Golder Associates készített 1996 végére egy előzetes biztonsági elemzést. Az Európai Unió PHARE programja keretében neves szakemberek látogatták meg a kutatások helyszíneit. 1998–99-ben a PHARE program anyagilag is támogatja az üveghutai

kutatásokat, két fúrásban speciális hidrogeológiai vizsgálatokat végeznek, és részt vesznek egy újabb biztonsági elemzés elkészítésében.

A hazai kutatások külföldi ismertetése nem kevésbé fontos. Ennek keretében a MÁFI 1997-ben magyar és angol nyelvű kiadványban számolt be a kis és közepes aktivitású hulladékok telephelykutatásának eddigi eredményeiről (MÁFI évi jelentése, 1996/II.). E jelentést számos külföldi intézménynek és nemzetközi szervezetnek megküldték, és arra sok pozitív visszajelzés érkezett.

Következtetések

1. Az a véleményem, hogy az eddigi kutatások helyes irányban haladtak, és nemzetközi összehasonlításban is magas szakmai színvonalat képviselnek.

2. Az eddigi kutatási eredmények alapján – véleményem szerint – mind a kis és közepes, mind a nagy aktivitású hulladékelhelyezésre irányuló kutatásokat folytatni kell, mert objektív lehetőség van sikeres befejezésükre.

3. A szakmai színvonal mellett kiemelt fontosságúnak tartom a helyi lakosság és az ország közvéleményének folyamatos és teljes körű tájékoztatását a kutatások állásáról.

4. A Magyar Tudományos Akadémia fontos szerepet tölt be e kutatások szakmai ellenőrzésében és támogatásában. Ennek szellemében a Tudományos Akadémia elnöke háromtagú bizottságot jelölt ki – Marx György akadémikus elnökletével – a kutatási eredmények felügyeletére. Az Akadémia ezenfelül évente vitaüléseket és ankétokat szervez az érintett szakemberek számára, továbbá állásfoglalásokat jelentet meg a kutatásokkal kapcsolatosan.

5. A kutatások – véleményem szerint – a gyakorlati feladat teljesítése mellett tudományos szempontból is fontosak, mert hazánkban ennek keretében volt először lehetőség a földtudományok valamennyi tudományágának, továbbá az izotópkémia, a matematikának és a számítástechnikának együttes alkalmazására.

Irodalom

- Balla Z. (1997): Kis és közepes radioaktív hulladékok elhelyezését célzó földtani kutatás, 1993–1996. (Site exploration for low and intermediate level radioactive waste disposal 1993–1996). *MÁFI Évi Jelentése, 1996/II. 27–45.*
- Balla Z., Tóth Gy., Könczöl N.-né (1997): Az üveghutai kutatási terület hidrogeológiai viszonyai (Hydrogeological conditions of the Üveghuta site and its area). *MÁFI Évi Jelentése, 1996/II. 135–141.*
- Bárdossy Gy. (1995): Radioaktív hulladék elhelyezésének kérdései Magyarországon. *Magyar Tudomány, 8. 935–942.*
- Bárdossy Gy. (1998): A radioaktív hulladékok elhelyezése Magyarországon. *Földtani Közlöny, 128/1. 179–196.*
- Buda Gy., Puskás Z. (1997): Az Üveghuta-1 fúrás kristályos kőzetei. (Crystalline rocks of Üveghuta-1 borehole). *MÁFI Évi Jelentése, 1996/II. 77–98.*
- Cramer, J. J., Smellie, J. A. T. (1994): *Final Report of the AECL/SKB Cigar Lake Analog Study.* Whiteshell Laboratories. Pinawa, Manitoba, Canada 393 p.
- Csicsák, J. (1996): Hydrogeological investigations on a claystone formation in the URL of Hungary. In: *TOPSEAL '96 Conference Stockholm. June 9–12. 1996. Vol. II. 201–204.*
- Demény, A., Fórizs, I., Máthé, Z. (1996): A preliminary stable isotope study on a potential radioactive waste repository site in the Mecsek Mountains, Southern Hungary. *Rapid Comm. in Mass Spectrometry, Vol. 10. 1415–1417.*
- Hámos, G. (1992): A javasolt nyugat-mecseki mélységi hulladéktároló földtani vonatkozásai. *Bányászati és Kohászati Lapok. Bányászat, 35–38.*
- Hámos, G., Máthé, Z., Majoros, Gy. (1996): The geology of Boda site, Hungary. Surface and URL based investigations. In: *TOPSEAL '96 Conference Stockholm. June 9–12. 1996. Vol. II. 196–200.*
- Kovács, L. (1996): Rock engineering investigations inside a claystone URL in Hungary. In: *TOPSEAL '96 Conference Stockholm. June 9–12. 1996. Vol. II. 205–208.*
- Kovács, L. (1997): A Bodai Aleurolit Formáció kőzetmechanikai és geotechnikai vizsgálati programja. *Bányászati és Kohászati Lapok. Bányászat, 130, 4, 299–306.*
- Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste (PAGIS).* (1998) Published by the Commission of the European Communities, Luxemburg, 268 p
- Szabó I. (1992): A környezetvédelem helye az energiapolitikában. *Biotechnológia és Környezetvédelem, 6. 2.*
- Vajda, Gy. (1991): Mi lesz az atomerőmű hulladékaival? *Magyar Tudomány, 9. 1094–1103.*
- Vajda, Gy. (1998): Energiaforrások. *Magyar Tudomány, 6. 645–675.*