

A DELISA-LTO projekt eredményei: integrált módszertan a VVER atomerőművek hosszú távú üzemeltetésének megalapozására

Results of the DELISA-LTO Project: An Integrated Methodology Supporting the Long-Term Operation of VVER Nuclear Power Plants

Szenthe Ildikó^a, Slonszki Emese^b, Dudra Judit^c, Szávai Szabolcs^d, Hargitai Balázs^e

^{a, b} HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Fűtőelem és Reaktoranyagok Laboratórium,
^a szenthe.ildiko@ek.hun-ren.hu, ^b slonszki.emese@ek.hun-ren.hu, ^e hargitai.balazs@ek.hun-ren.hu
^{c, d} AEMI Atomenergia Mérnökiroda Kft., műszaki divízió, ^c dudra.judit@aemi-tech.hu, ^d szavai.szabolcs@aemi-tech.hu

Kulcsszavak

DELISA-LTO,
VVER,
hosszú távú üzemeltetés,
termikus öregedés,
sugárzás okozta duzzadás,
roncsolásmentes vizsgálat,
öregedéskezelés,
korlátozott időtartamra érvényes
elemzések (TLAA)

Keywords

DELISA-LTO,
VVER,
long-term operation (LTO),
thermal ageing,
irradiation induced swelling,
non-destructive testing (NDT),
ageing management,
time limited ageing analysis
(TLAA)

Absztrakt

A DELISA-LTO (Description of the extended Lifetime and its influence on the Safety operation and construction materials performance – Long-Term Operation with no compromises in the safety) Euratom projekt, mely 2022-ben indult és napjainkban zárult, a VVER atomerőművek hosszú távú üzemeltetésének (LTO) anyagtudományi és szerkezetintegritási kérdéseit vizsgálta. A projekt középpontjában a termikus öregedés és a reaktorbelső szerkezeti elemek sugárzás okozta duzzadása állt, a kísérleti anyagvizsgálatok, a roncsolásmentes vizsgálatok, a numerikus modellezés és a szabályozási gyakorlat integrált értékelésével. A záró D5.5 jelentés a projekt eredményei alapján integrált, bizonyítékalapú öregedéserőltékelési megközelítést és továbbfejlesztési ajánlásokat fogalmazott meg. A vizsgálatok igazolták, hogy az öregedési viselkedés erősen anyag- és komponensfüggő: több ausztenites primerköri alapanyag és hegesztett kötés 60 évnek megfelelő termikus öregítés után is nagy szerkezeti stabilitást mutatott, miközben egyes VVER 1000 reaktorkarima-kötőelemeknél jelentős ridegdedést mértek. A duzzadás értékelésében a 2D/3D modellek és benchmarkok jó egyezést mutattak, ugyanakkor a VVER 1000 reaktorbelső szerkezeti elemekre további kísérleti adatok és megbízhatósági kritériumok szükségesek. A projekt fontos eredménye továbbá a korszerű örvényáramos gőzfejlesztőcső-vizsgálatok összehasonlító validálása, valamint a szabványok és öregedéskezelési programok továbbfejlesztésére megfogalmazott ajánlásrendszer.

Abstract

The DELISA-LTO Euratom project (2022–2026) investigated materials science and structural integrity aspects of the long-term operation (LTO) of VVER nuclear power plants. The project focused on thermal ageing and irradiation induced swelling of reactor internals by integrating experimental materials testing, non-destructive examination, numerical modelling and the review of regulatory practices. The final D5.5 report consolidated an integrated, evidence-based approach to ageing assessment and recommendations for further development, based on the project's findings. The results confirmed that ageing behaviour is strongly material- and component-dependent: several austenitic primary-circuit base materials and weldments retained high structural stability after thermal ageing equivalent to 60 years of operation, while selected VVER 1000 reactor flange fasteners exhibited significant embrittlement. For swelling assessment, validated 2D and 3D models and benchmark exercises showed good consistency, although additional experimental data and failure criteria are still required for VVER 1000 reactor internals. Further key outcomes include the round-robin validation of advanced eddy-current techniques for steam-generator tubes and recommendations for future development of codes, standards and ageing-management programmes.

1. Bevezetés

Az európai atomerőművi blokkok jelentős része elérte vagy megközelíti az eredetileg figyelembe vett tervezési üzemidőt, sőt egyes esetekben már a kiterjesztett üzemidő végéhez közelednek. A hosszú távú üzemeltetés műszaki megalapozása ezért egyre kevésbé tekinthető egyszeri élettartam-hosszabbítási feladatnak: olyan folyamatos mérnöki tevékenységgé vált, amelyben az öregedéskezelés, a szerkezetintegritási számítások, az üzemközi vizsgálatok és időszakos karbantartások, az anyagvizsgálatok és az új tudományos eredmények egymásra épülnek. A biztonsági funkciók fenntarthatóságát nem elegendő a tervezési tartalékokra hivatkozva igazolni; a hosszabbított üzemidő alatt a tényleges anyagállapotot és annak várható változását is megfelelő bizonyossággal kell ismerni.

A DELISA-LTO projekt erre a kihívásra adott összehangolt európai választ. A 101061201 számú támogatási megállapodás keretében, a HORIZON-EURATOM-2021-NRT-01 felhívásban megvalósult projekt 2022. június 1-jétől 2026. július 31-ig, 50 hónapon keresztül futott. A kilenc partnert egyesítő konzorcium, öt ország – Csehország, Szlovákia, Magyarország, Finnország és Ukrajna – kutatóintézeteiből, műszaki támogató szervezeteiből és egyetemi/ipari kutatási szereplőiből állt; koordinátora a csehországi Centrum Výchumu Řež volt. A projekt a VVER-technológiára koncentrált, ugyanakkor a kidolgozott

mérnöki elvek és módszerek jelentős része más könnyűíves reaktortípusokra is átvihető.

A projekt indulásakor az Anyagvizsgálók Lapja már bemutatta a DELISA-LTO célkitűzéseit és munkacso-magjait [1]. A jelen cikk célja a lezárt projekt fő műszaki eredményeinek összefoglalása, elsősorban a záró D5.5 jelentés [2] alapján. A hangsúlyt nem az egyes munkacso-magok részletes ismertetésére helyezzük, hanem arra, hogy a kísérleti, modellezési, NDT (roncsolásmentes vizsgálat) és szabályozási eredmények milyen közös következtetésekhez vezettek a 60 évet elérő, illetve meghaladó üzemidő műszaki megalapozásában.

2. A projekt megközelítése és a kritikus szerkezetek azonosítása

A DELISA-LTO alap gondolata szerint az öregedési állapot megbízható értékelése nem alapozható egyetlen mérési vagy számítási módszerre. A projekt ezért három, egymást kölcsönösen támogató információforrást kapcsolt össze: a roncsolásos és mikroszerkezeti anyagvizsgálato-kat, a roncsolásmentes vizsgálatokat, valamint a nume-rikus modellezést. Ezeket egészítette ki a nemzeti sza-bályozási gyakorlatok, öregedéskezelési programok és korlátozott időtartamra érvényes elemzések (time limited ageing analysis, TLAA) áttekintése. A végső módszertan

lényege a keresztvalidálás: egy mérnöki következtetés megbízhatóságát az növeli, ha azt eltérő fizikai elven működő, független vizsgálati és számítási eredmények egyaránt alátámasztják.

A részt vevő országok gyakorlatának felmérése alapján a termikus öregedés szempontjából kiemelt szerkezetek közé a reaktortartály, a gőzfejlesztő és annak hőátadó csövei, a térfogatkompenzátor, a primerkörü csővezetékek és hegesztett kötéseik, valamint egyes szivattyú- és kötőelemek tartoznak. A sugárzás okozta duzzadás ezzel szemben elsősorban a reaktorbelső szerkezeti elemek – különösen a VVER 1000 zónapalástja, a VVER 440 aktívzóna-kosara, továbbá a tartó- és rögzítőelemek – öregedési mechanizmusa.

A projekt egyik lényeges következtetése, hogy a „kritikus” minősítés nem pusztán a biztonsági osztályból vezethető le. A prioritást a biztonsági jelentőség, az üzemi környezet, az anyag degradációs érzékenysége, a gyártási és hegesztési előélet, a neutronfluencia, a hozzáférhetőség és a korábbi vizsgálati eredmények együttesen határozzák meg. Ebből következik a fokozatos, kockázat- és bizonyítékalapú öregedéskézelés: a vizsgálati gyakoriságot és az elemzési mélységet a tényleges degradációs potenciálhoz célszerű igazítani.

3. Termikus öregedés – kísérleti eredmények és következtetések

A projekt kísérleti programja üzemi előélettel rendelkező, leszerelt blokkokból és működő VVER-egységekből származó anyagokból, valamint összehasonlító „as-received” állapotú anyagokból épült fel. A mesterséges termikus öregítést egységesen 450 °C-on végezték; az idő-hőmérséklet megfeleltetést Arrhenius-alapú összefüggésekkel határozták meg. A vizsgálati mátrix alapanyagokat, hegesztési varratokat és hőhatásövezeteket egyaránt tartalmazott. A mechanikai vizsgálatok között keménységmérés, szakítóvizsgálat, Charpy-vizsgálat, Small Punch vizsgálat és törésmechanikai vizsgálatok szerepeltek; ezeket optikai és elektronmikroszkópos, transzmissziós elektronmikroszkópia (TEM), pozitronannihilációs spektroszkópia (PAS), atomerő-mikroszkópia (AFM) és további mikroszerkezeti módszerek egészítették ki. Az ODIN (Online Data & Information Network of the European Commission) európai adatbázis kezelő rendszer MatDB adatbázisába 1189 mechanikai vizsgálat került, a mikroszerkezeti vizsgálatok száma pedig nagyságrendileg ezer volt.

A legfontosabb eredmény az anyagot alkotó fázisoktól való függőség egyértelmű igazolása. A vizsgált ausztenites primerkörü alapanyagok – különösen a 08H18N12T és 08H18N10T acélok – és hegesztett kötéseik a 60 évnek megfelelő termikus öregítésig általában nagy szerkezeti stabilitást mutattak. A folyáshatár és szakítószilárdság változásai többnyire a mérési szóráson belül maradtak; egyes anyagoknál 2-14% közötti eltéréseket mértek. A felső határ (upper shelf) ütmunka csökkenése alapanyagoknál és varratoknál jellemzően mérsékelt volt, a projekt összegző jelentése szerint mintegy 14-20%-os csökkenéssel. A VVER 1000 reaktor főhűtőkörü, 10GN2MFA jelű

csővezetékanyag rideg-képlékeny átmeneti hőmérséklet eltolódása legfeljebb mintegy 20 °C, az upper shelf energia csökkenése 5-15 J volt, míg a „Mestergörbe” referencia-hőmérséklet változása statisztikailag nem volt jelentős, jellemzően 5,2 °C alatt maradt.

Ezzel élesen szemben állt egyes ferrites VVER 1000 reaktorkarima-kötőelemek viselkedése. A vizsgált töcsavaroknál körülbelül 40 °C-os átmeneti hőmérséklet-eltolódást és 49-68 °C-os „Mestergörbe” referencia-hőmérséklet-változást mutattak ki; az anyáknál az átmeneti hőmérséklet változása megközelítette az 50 °C-ot, a felső határ energia pedig számottevően csökkent. Ezek az értékek meghaladták a D5.5-ben hivatkozott PNAE G-7-002-86 30 °C-os kritériumát. A projekt ezért e komponenseket a hosszú távú üzemeltetés során kiemelt figyelmet igénylő elemek közé sorolta, amelyeknél célzott anyagállapot-követés, törésmechanikai újraértékelés, illetve szükség esetén beavatkozási vagy cserestratégia indokolt.

A kísérleti program azt is megmutatta, hogy egyetlen anyagjellemző nem tekinthető univerzális öregedési indikátornak. A keménységváltozás több esetben nem követte megfelelő érzékenységgel a szívósság vagy törési ellenállás változását. A makroszkopikus mechanikai tulajdonságok és a PAS, AFM, Mössbauer-spektroszkópia, SEM/TEM eredmények együttes értelmezése ezért lényegesen nagyobb bizonyosságot ad az öregedési folyamat megítélésében.

4. Sugárzás okozta duzzadás és a reaktorbelső szerkezet elemek modellezése

A sugárzás okozta duzzadás a reaktorbelső szerkezeti elemek speciális, hosszú távon geometriai és feszültségi következményekkel járó öregedési mechanizmusa. Az ausztenites acélok neutronbesugárzás hatására térfogatváltozást és besugárzási kúszást szenvedhetnek, ami csökkentheti a szerkezeti hézagokat, megváltoztathatja az érintkezési viszonyokat, a hűtőközeg áramlását és a helyi feszültségállapotot. A projektben ezért a duzzadási törvények, a termohidraulikai terhelések és a szerkezeti válasz összekapcsolására 2D és 3D numerikus modelleket fejlesztettek és benchmark elemzéseket végeztek.

A benchmarkokban a résztvevők jól megalapozott, egymással jó egyezést mutató eredményeket kaptak, ami megerősítette az összetettebb 3D értékelések alapját. A VVER 440 esetében a projekt összegzése szerint a duzzadás nem jelentett meghatározó biztonsági korlátot, és a kosár-tartály, illetve kosár-fűtőelem hézagok elfogyása nem volt azonosítható élettartam-korlátozó problémaként. A VVER 1000 esetében ugyanakkor a számítások lényegesen nagyobb érzékenységet jeleztek: a vizsgált modellben a legnagyobb hőmérséklet mintegy 384 °C volt a zónapalást harmadik gyűrűjében, ahol a 80. kampány után a maximális térfogati duzzadási alakváltozás megközelítette a 9%-ot, az egyenértékű kúszási alakváltozás pedig a 3%-ot. A palást és a zónaköpeny közötti hézag elfogyása a számítások szerint már a 30. kampánytól megkezdődhet. Hazai vonatkozásban az eredmény ambivalens, mivel jó hír a jelenleg üzemelő blokkok további

üzemidő hosszabbításának tekintetében, ugyanakkor erősen felhívja a figyelmet arra, hogy az építés alatt lévő két VVER 1200-as blokk esetében is szükségzerű lenne ellenőrző számításokat végezni, mivel ez a károsodási folyamat jelentősen korlátozhatja az eredetileg 60 évre tervezett élettartamot.

A jelentés ugyanakkor hangsúlyozza a modellbizonytalanságokat is. A legfontosabb korlát az erősen besugárzott 08H18N10T acélra rendelkezésre álló kísérleti adatok szűkossége, valamint a besugárzásnak kitett reaktorbelső elemek duzzadásra és alakváltozásra vonatkozó, egyértelmű meghibásodási kritériumainak hiánya. A projekt következtetése ezért nem pusztán a modellek további finomítása, hanem új, jól dokumentált kísérleti adatok gyűjtése, a modellvalidáció, érzékenységvizsgálat és bizonytalanságkezelés szabályozott beépítése a jövőbeli értékelési eljárásokba.

5. Roncsolásmentes vizsgálatok és a gőzfejlesztőcsövek állapotértékelése

A DELISA-LTO egyik gyakorlati fókusz a VVER 440 gőzfejlesztő hőátadó csöveinek örvényáramos vizsgálata volt. A körvizsgálat (round-robin test, RRT) 36 valós csőszakaszt tartalmazó SGT-VUJE-2023/1 próbatesten hasonlított össze a különböző vizsgálati rendszereket és kiértékelési eljárásokat. A résztvevő csapatok eredményei között tapasztalt eltérések elsősorban az alkalmazott eljárásokból, mérési módszerekből és indikáció-detektálási határból adódtak, ami közvetlenül rámutatott a minősítés és a harmonizált kiértékelés fontosságára.

A projekt eredményei alapján a hagyományos bobbín szondás vizsgálatot célszerű forgó szondás technikával kiegészíteni. A bobbín szonda gyors és hatékony teljes csőhosszas szűrésre, de korlátozottabb lehet a cső-csőfal átmenetnél és a kerületi repedések jellemzésében. A forgó, illetve irányított szondák ezekben a kritikus zónákban növelik a detektálási és a méretmeghatározási képességet. A zárójelentés külön kiemeli a minősített berendezés, az egységes eljárás, a képzett és tanúsított személyzet, valamint a többszintű adatkértékelés szerepét. A körvizsgálatok alkalmazása nemcsak a módszer érzékenységét igazolja, hanem a reprodukálhatóságot és a szabályozói elfogadhatóságot is erősíti.

Ez a megközelítés jól példázza a projekt „korai figyelmeztetés” koncepcióját. A korszerű roncsolásmentes vizsgálatok önmagukban nem váltják ki a hagyományos integritásértékelést, hanem olyan nagy minőségű állapotinformációt szolgáltat, amely visszacsatolható az öregedési modellekbe, a karbantartási és csődugózási döntésekbe, valamint az ellenőrzési periódusok optimalizálásába.

6. A projekt fő ajánlásai

Az eredményeket összefoglaló záróriport alapján, a projekt egyik legfontosabb tanulsága, hogy a kutatási eredményeket nem önálló vizsgálati eredményekként, hanem a szabványok, irányelvek és öregedéskézelési gyakorlat továbbfejlesztésére alkalmas

ajánlásrendszerként értelmezi. A felülvizsgált nemzeti gyakorlatok alapelvei nagyrészt közősek: minden részt vevő ország alkalmaz öregedéskézelési programokat, kijelöli a korlátozott időtartamra érvényes elemzések alá eső berendezéseket, és az üzemidő hosszabbítást megalapozó elemzések alapvető elvei az IAEA ajánlásai-val összhangban állnak. A gyakorlati megvalósítás ugyanakkor eltérhet, például az időszakos biztonsági jelentésre (IBJ) vagy a licensz megújításra (üzemelési engedély megújítására) irányuló eljárás hangsúlyában.

A szabályozási és szabványosítási továbbfejlesztéshez a projekt több irányt jelölt ki. Ilyen a keménység és mechanikai tulajdonságok közötti, reaktoranyag-specifikus korrelációk kísérleti újraigazolása; az Arrhenius-alapú gyorsított termikus öregítés harmonizált módszertana; az alapanyagok, hegesztési varratok és hőhatásövezetek eltérő öregedési viselkedését figyelembe vevő anyag-specifikus kritériumok; a VVER 1000 duzzadásértékelési mérési és modellezési eljárásainak részletesítése; továbbá a modellvalidáció, érzékenységvizsgálat és bizonytalanságkezelés követelményeinek erősítése.

Különösen fontos a monitoring és a modellezés közötti „zárt visszacsatolási kör” kialakítása. A korszerű öregedéskézelésben az üzemközi vizsgálat nem pusztán megfelelés-ellenőrzés: a mért állapotadatoknak vissza kell hatniuk a prediktív modellekre, a modelleknek pedig támogatniuk kell a következő vizsgálat helyének, módszerének és időpontjának megválasztását. Ezzel az öregedéskézelés a reaktív hibakereséstől fokozatosan a prediktív, állapot- és kockázatalapú döntéstámogatás felé mozdulhat el.

A végkövetkeztetések hangsúlyos eleme a nyomon követhetőség is. A hosszú távú üzemeltetésre vonatkozó mérnöki döntések akkor tarthatók fenn évtizedeken keresztül, ha a vizsgálati adatok, anyagjellemzők, modellfeltételezések, bizonytalanságok és végső következtetések közötti kapcsolat dokumentált és később újraértékelhető. Ez nem adminisztratív többlet, hanem a bizonyítékalapú öregedéskézelés egyik műszaki feltétele.

7. Összegzés és további kutatási irányok

A DELISA-LTO projekt fő tanulsága, hogy a hosszú távú üzemeltetés műszaki megalapozásában nem létezik egyetlen „mindent eldöntő” vizsgálati módszer vagy modell. A megbízható állapotértékelés a szabályozási követelmények, az üzemeltetési tapasztalat, a roncsolásmentes vizsgálatok, a mechanikai és mikroszerkezeti anyagvizsgálatok, a numerikus szimulációk és a szerkezetintegritási elemzések egymásra épülő, keresztvalidált alkalmazását igényli. A projekt e különböző információforrásokat egységes mérnöki keretbe rendezte.

A termikus öregedési vizsgálatok alapján a vizsgált ausztenites primerköri anyagok és hegesztett kötések jelentős része 60 évnek megfelelő állapotig kedvező stabilitást mutatott, ugyanakkor a ferrites reaktorkarima-kötőelemek példája igazolta, hogy az azonos üzemi idő nem jelent azonos öregedési kockázatot. A duzzadási benchmarkok megerősítették a 2D/3D modellezés alkalmazhatóságát,

1. táblázat: A projekt néhány számszerű eredménye

Terület	Eredmény	Mérnöki jelentőség
Kísérleti program	1189 mechanikai vizsgálat és ~1000 mikroszerkezeti vizsgálat	Széles, több módszerrel keresztvalidált adatbázis
VVER 1000 töcsavar	TT-eltolódás ~40 °C; Master Curve T_0 -változás 49-68 °C	Kiemelt LTO-figyelmet igénylő termikus ridegedés
VVER 1000 anya	TT-változás közel 50 °C; USE-csökkenés	A 30 °C-os hivatkozott kritérium meghaladása
Fő hűtőköri csővezeték	TT-eltolódás ≤ 20 °C; USE-csökkenés 5-15 J; T_0 -változás <5,2 °C	A termikus öregedés hatása a vizsgált anyagokra korlátozott
VVER 1000 duzzadási modell	max. T ~384 °C; max. térfogati duzzadás ~9%; kúszás ~3 % a 80. kampány után	A geometriai hézagok és a feszültségállapot modellezése LTO-ban kritikus, VVER-1200 blokkos elemzése is szükséges
Gőzfejlesztőcső RRT	36 valós csőszakasz; bobbin + forgó szonda kombináció	Minősített, kombinált ECT javítja a detektálást és jellemzést

de egyúttal megmutatták, hogy a 60 éven túli extrapoláció bizonytalansága csak új kísérleti adatokkal és validációval csökkenthető, felhívták a figyelmet az épülő blokkoknál is vizsgálandó öregedési mechanizmusra. A gőzfejlesztőcsővek körvizsgálata pedig a korszerű, kombinált örvényáramos vizsgálati technikák és a minősítés gyakorlati jelentőségét demonstrálta.

A projekt előkészítésekor a 60 éves üzemidő jelentette az elsődleges célhorizontot. Az elvégzett munka eredményei már arra hívják fel a figyelmet, hogy egyes VVER-üzemeltetők 80 éves üzemidőt is vizsgálnak; ezért a projekt eredményeinek 80, illetve akár 100 éves időtávra történő kiterjesztése önálló kutatási feladat. Kiemelt kérdés marad a termikus öregedési modellek 60 év feletti prediktivitása – különösen a Charpy-energia, az átmeneti hőmérséklet és a Master Curve T_0 előrejelzése –, továbbá a duzzadási modellekhez szükséges besugárzott anyagadatok bővítése.

Összességében a DELISA-LTO nem egy új, minden meglévő szabályt felváltó eljárást hozott létre. Eredménye inkább egy rugalmas, továbbfejleszthető mérnöki filozófia: a meglévő öregedéskezelési és integritásértékelési gyakorlatok megerősítése validált kísérleti adatokkal, benchmarkolt modellekkel, minősített NDT-technikákkal és következetes bizonytalanságkezeléssel. Ez a megközelítés a VVER blokkok 60+ éves biztonságos üzemeltetésének megalapozása mellett más könnyűvízes reaktorok élettartam-gazdálkodásában is hasznosítható.

Köszönetnyilvánítás

A tanulmány a DELISA-LTO projekt eredményeire épül. A projekt az Európai Unió Euratom kutatási és képzési programjának támogatásával, a 101061201 számú támogatási megállapodás keretében valósult meg. A közölt nézetek és következtetések a szerzők szakmai összefoglalását tükrözik.

Irodalomjegyzék

- [1] Szávai S., Dudra J.: DELISA-LTO projekt: Description of the extended lifetime and its influence on the safety operation and construction materials performance – Long term operation with no compromises in the safety. Anyagvizsgálók Lapja, 2022/IV, 72–74.
- [2] DELISA-LTO: D5.5 – Final report on the analysis of the guidelines. Work Package 5, Task 5.3, final version, 31.07.2026.
- [3] DELISA-LTO: Description of Action / Technical Description, HORIZON-EURATOM-2021-NRT-01, Grant Agreement No. 101061201.
- [4] Dubyk, Y. et al.: D3.3 Benchmark of swelling evaluation. DELISA-LTO Project, 2024.
- [5] Zarazovskii, M. et al.: Report on Thermal Ageing Evaluation and impacts on LTO. D3.5, DELISA-LTO, 2025.
- [6] Szenthe, I. et al.: Report on the thermal ageing evaluation based on the experimental data obtained within T4.2 and T4.4. D4.5, DELISA-LTO, 2026.
- [7] Benak, M. et al.: Report on the Test Results. D4.6, DELISA-LTO, 2026.
- [8] Slugen, V. et al.: Report from non-destructive testing. D4.8, DELISA-LTO, 2025.



ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA
PUBLIKÁLJON NÁLUNK!

**Írjon szakmai vagy általános
témájú cikket**
az

Anyagvizsgálók Lapjába!

Részletekért látogassza meg honlapunkat,
vagy írjon az alábbi email címre:

avilap.szerk@gmail.com

www.avilap.hu

