

Mi rejtőzik az aszfalt alatt? – Georadar technológia a közúti infrastruktúra diagnosztikájában

Beneath the pavement – Ground Penetrating Radar for infrastructure assessment

BALOGH Olivér¹, RUNA Boglárka¹, TRENKA Sándor¹

¹RODEN Mérnöki Iroda Kft., 1089 Budapest, Villám utca 13.,
tel: (36-1)814-97-00, fax: (36-1)814-97-03,
e-mail: roden@roden.hu, honlap: www.roden.hu

Abstract

GPR technology is increasingly being applied in the design and monitoring of pavement structures, as it enables the identification of critical information required for road design and rehabilitation planning, which cannot be obtained by other testing methods, or only at discrete points. As part of ongoing efforts to expand knowledge related to this technology, this paper draws on the results of investigations conducted in recent years to demonstrate the wide range of professionally relevant pavement structure and condition information that can be obtained through the application of radar technology.

Keywords: GPR, non-destructive, pavement structure, condition assessment, subsurface imaging

Kivonat

A radartechnológiát egyre szélesebb körben alkalmazzák a pályaszerkezet-tervezés és gazdálkodás munkafolyamataiban, hiszen használatával meghatározhatók a felújítás tervezés és a kivitelezés szempontjából elengedhetetlen pályaszerkezeti információk, amelyek egyéb vizsgálati eljárásokkal nem, vagy csak pontszerűen lennének feltárhatók. A technológiával kapcsolatos ismeretek kiszélesítésére irányuló törekvés-ként jelen cikkben az elmúlt évek vizsgálati eredményeire támaszkodva mutatjuk be, hogy a radartechnológia alkalmazásával milyen széleskörű és szakmailag releváns pályaszerkezeti információszolgáltatás valósítható meg.

Kulcsszavak: GPR, roncsolásmentes, útdiagnosztika, állapotértékelés, földalatti térképezés

1. BEVEZETÉS

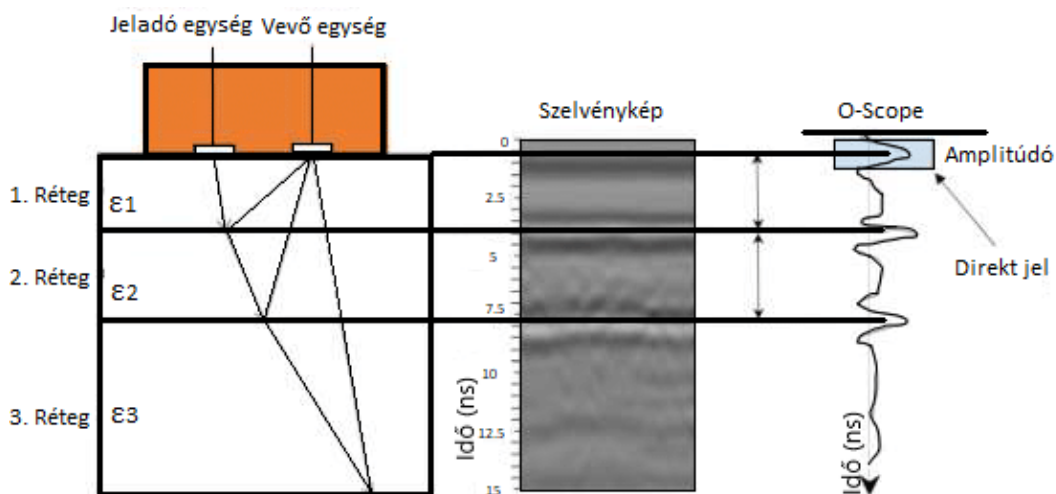
A pályaszerkezet diagnosztikai állapotértékelésére hagyományosan alkalmazott – jellemzően roncsolásos – vizsgálati eljárásoknak számos hátránya van, melyek közül kiemelendő a mintavétel által a pályaszerkezetben okozott szerkezeti kár, a pontszerű információszolgáltatás és az abból adódó kiterjeszhetőségi problémák, a mintavétel során kialakuló forgalmi zavar, valamint az ennek következtében megnövekedett balesetveszély. Kiemelten nehéz a feladat az úthálózat vasbeton elemeinek állapotértékelése során, hiszen ehhez számos olyan szerkezeti- és anyagi információra van szükségünk, amely a hagyományos vizsgálati módszerek alkalmazásával nem feltárható. Továbbá ezen szerkezetek diagnosztikai állapotfelmérését olyan vizsgálatokkal kell elvégezni, amelyek a szerkezetben minimális károsodást okoznak, így nem veszélyeztetik annak integritását és stabilitását [5].

A beruházás/felújítás előkészítési szakaszában hagyományosan alkalmazott vizsgálati eljárások térbeli korlátai miatt a felszín alatti térrész heterogenitása nem térképezhető teljeskörűen, melynek következtében a kivitelezési fázisban jelentkezhetnek előre nem látható, számottevő többletmunkával és költségnövekedéssel járó műszaki nehézségek. Mindezen problémák előfordulási gyakorisága azonban minimalizálható a korszerű, roncsolásmentes vizsgálati technológiák kiegészítő alkalmazásával. A beruházási területen végrehajtott roncsolásmentes georadar vizsgálatokkal folytonos információt kaphatunk a szerkezet felépítéséről, a rétegek vastagságáról, a vasbeton szerkezetek vasalás kiosztásáról és betontakarásáról, a rejtett geometriai tulajdonságokról és károsodásokról, például kiüregelődések és repedezettség, valamint az előzetesen nem ismert közműátvezetésekről.

A radartechnológia alkalmazásával elérhető széleskörű pályaszerkezeti adatszolgáltatás kiváló kiegészítője lehet a szabvány szerint előírt vizsgálatokkal nyert adatoknak, valamint segítséget nyújthat a konvencionálisan alkalmazott vizsgálatok szelvényeinek és a javasolt mintavételi gyakoriságnak a megállapításához. Ezáltal a szükséges roncsolásos mintavételek száma és az általuk okozott szerkezeti kár minimalizálható.

2. ELMÉLETI HÁTTÉR

A georadar technológia az építőiparban is széleskörben alkalmazott, nagy frekvencián kisugárzott elektromágneses impulzusok felhasználásával működő, sekélygeofizikai vizsgálati eljárás. A radar három alapvető egységből épül fel, nevezetesen az adó- és a vevőantennából, valamint a vezérlőegységből, amelyek együtt felelnek a jelek kibocsátásáért, fogadásáért és digitalizálásáért. Az adóantenna adott időpontoként ismétlődő elektromágneses (EM) impulzusokat bocsát ki a felszín irányába. Ezen EM hullámok az eltérő dielektromos tulajdonságú felületek és objektumok határáról részben visszaverődnek. A visszavert jelek amplitúdóját és fázisát a vevőantenna detektálja, majd a vezérlőegység digitálisan rögzíti az idő függvényében [4]. A nagy frekvenciának és terjedési sebességnek köszönhetően a felszín alatti térrészről nagy felbontású mélység-idő szelvények készíthetők [2]. Az így kapott szelvényképeken követhető a pályaszerkezet rétegfelépítése, a rétegek lefutása, vastagsága, valamint a mérés nyomvonala mentén térképezhetők a mérés irányára merőleges, vagy közel merőleges pozíciójú szerkezetbe ágyazott objektumok (pl. vasalások, üregek, közművek). A szerkezeti felépítésen túl a radartechnológia alkalmas az aszfaltkeverékek testsűrűségének és szabadhézag tartalmának megbecslésére, a földműanyagok tömörségének és nedvességtartalmának monitorozására, valamint a vasbeton szerkezetek tönkremeneteli zónáinak a jó állapotú részeketől való elkülönítésére is. Ennek alapja a réteghatárról visszavert radarjelek amplitúdójának elemzése, amely összefüggésben van a réteg elektromos vezetőképességének és dielektromos állandójának változásával [6] [8] [10].



1. ábra. Radarjel visszaverődése a különböző dielektromos tulajdonságú közegek határáról

3. ANYAG ÉS MÓDSZERTAN

A gyors, forgalom minimális zavarásával járó adatgyűjtés megvalósítása érdekében, egy hordozó gépjármű átalakításával, különböző mérőeszközöket (georadar rendszer, helymeghatározó rendszer, videokamera rendszer) integrálva kiépítettünk egy útpályadiagnosztikai mérőrendszert, amely egyedülálló módon alkalmas nagy pontosságú, folytonos pályaszerkezeti információgyűjtésre. A 4+1 db levegőkapcsolt antennából, egy adatgyűjtő és vezérlő egységből, valamint egy távolságmérő berendezésből álló georadar rendszer biztosítja a vizsgált sáv teljes szélességében a felszín alatti térrész letapogatását, valamint a mérés reprodukálhatóságát. A nagy pontosságú helyazonosítást egy, a vezérlőegységhez csatlakoztatott Leica RTK GPS garantálja. A videokamera rendszer egy rögzítő eszközből, 4 db GoPro HD kamerából, valamint egy GPS-ből épül fel. A kamerák rögzítik a vizsgálandó burkolatfelület állapotát, valamint az útpálya környezetét. A georadar adatok és a videófelvételek integrációja koordináta alapon történik [7].

A kézi georadaros felmérések előre definiált gridháló mentén kerülnek elvégzésre, amelynek eredményeként a felszín alatti térrészről nagy felbontású, részletgazdag leképezés áll elő, lehetővé téve a felszín alatti szerkezetek és objektumok azonosítását. A gridháló biztosította térbeli lokalizáció kiegészítéseként a mérési adatokhoz minden esetben GPS koordináta is társul, amely lehetővé teszi a felszín alatti objektumok helyzetének nagy pontosságú kijelölését.



2. ábra. A RODEN Mérnöki Iroda útpályadiagnosztikai mérőrendszere (bal); kézi földkapcsolt georadar antenna (jobb)

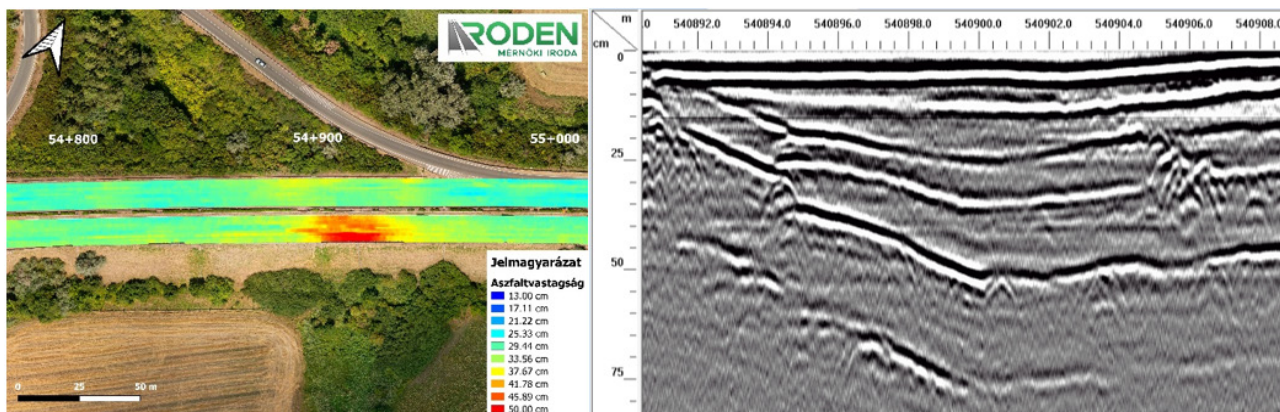
4. SZOLGÁLTATOTT ADATOK BEMUTATÁSA

A fejezet célja, hogy az elmúlt években, összesen közel 1400 km hosszúságban – különböző rangú és építési idejű útszakaszokon – elvégzett radarmérések eredményeire támaszkodva reprezentatív módon ismertesse, hogy az infrastrukturális létesítmények tervezési, kivitelezési és üzemeltetési folyamataihoz kapcsolódóan a georadar technológia alkalmazásával milyen releváns információk nyerhetők a felszín alatti térrész szerkezetéről és állapotáról.

4.1. Pályaszerkezetről szolgáltatott adatok

4.1.1. Pályaszerkezet rétegfelépítése és a rétegek vastagsága

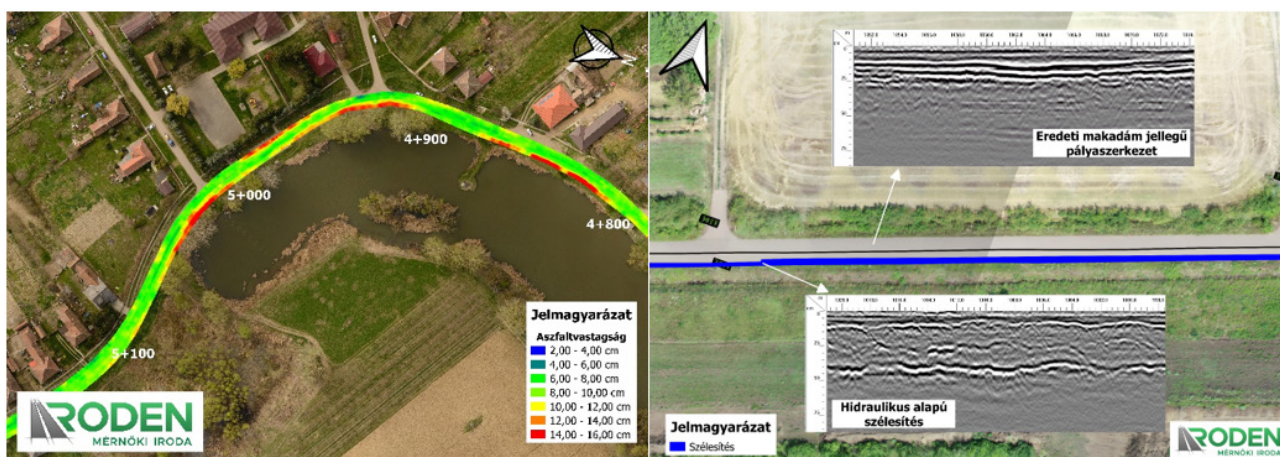
A radarmérés eredményeként a fúrásokkal történő ellenőrzés megbízhatóságát elérő pontosságú, kvázi folytonos információt kaphatunk a pályaszerkezet rétegfelépítéséről és a rétegvastagságok hossz- és keresztmetszet menti változásáról. Ezen pályaszerkezeti adatok felhasználhatók a felújítás tervezés során a pályaszerkezet méretezéshez, a szőnyegezés tervezéshez, a szerkezeti gyengülések és lokális süllyedések szelvényeinek lehatárolásához, valamint a kivitelezés során beépített anyagmennyiségeknek, mint a beruházási költségek egyik legdrágább összetevőjének, minden eddiginél pontosabb ellenőrzéséhez [7].



3. ábra. Autópálya szakaszon radar alkalmazásával meghatározott aszfaltvastagság hő térképen ábrázolva (bal); azonosított süllyedést bemutató radar szelvénykép (jobb)

4.1.2. Pályaszélesítések vizsgálata

A korábban megépült útszakaszok szerkezetének felépítésére jellemző a forgalom fejlődésével rendre megvalósult keresztmetszet bővítés, szélesítés és hozzáépítés, amely az eredeti pályától gyakran eltérő anyaggal és vastagsággal történt. Ennek eredményeként a szerkezetek hossz- és keresztirányban rendkívül változatosak. A szélesítés és hozzáépítés által érintett, teherbírás szempontjából kritikus szerkezetek szelvényeinek lehatárolása nélkülözhetetlen az adott útszakasz felújítás tervezése során. Kutatási eredményeink alapján igazoltuk, hogy a 2 cm mintavételezési sűrűséggel és 4 db antennával elvégzett sávonkénti felmérések adatainak elemzésével feltárható és modellezhető az útpálya keresztmetszeti heterogenitása.



4. ábra. Kétoldali lokális pályaszélesítések megjelenése a rétegvastagságot bemutató hő térképen (bal); eredeti pályától eltérő anyaggal megvalósult pályaszélesítés helyzetének koordinátahelyes megjelenítése és az eltérő pályaszerkezetek szelvényképei (jobb)

4.1.3. Homogén szakaszok lehatárolása

Az útpályaszerkezetek megerősítés méretezésének fontos momentuma a tervezési szakasz homogén alszakaszokra bontása. Hazánkban gyakori a több ütemben végrehajtott útépités és szélesítés, valamint a felújítások során különböző technológiák alkalmazása, amelyek inhomogén pályaszerkezeteket eredményeznek [9]. A nagy mintavételezési sűrűséggel elvégzett radarmérés eredményeként feltárt szerkezeti adatok alapján elvégezhető a homogén útszakaszok pontos kijelölése. Ez sokkal precízebb diagnosztizálást tesz lehetővé, mint a lokálisan fűrt burkolatminta adatok alapján elvégzett szakaszolás. A homogén szakaszképzésnek azért van nagy jelentősége a megerősítésméretezés során, mivel a hatályos Útügyi Műszaki Előírás szerint egy homogén szakaszon belül azonos vastagságú megerősítést alkalmazunk [9].

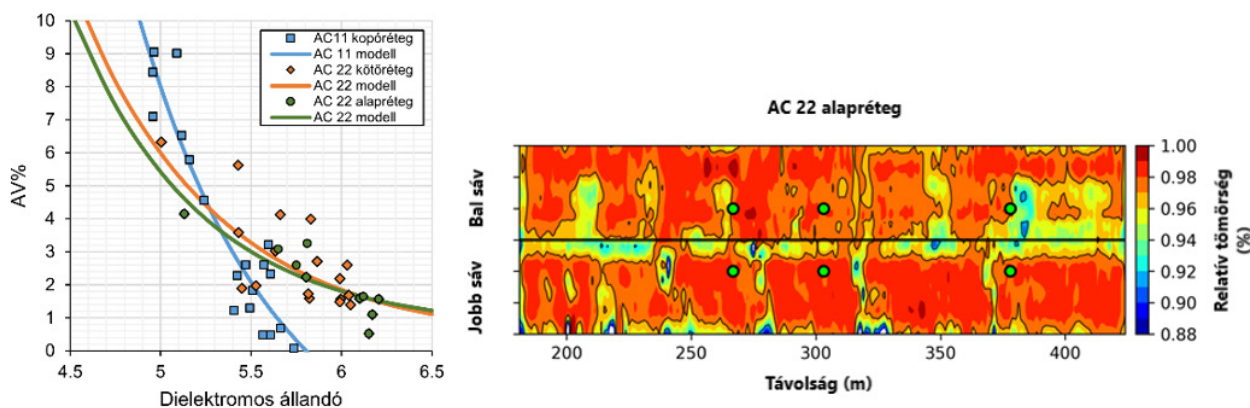
4.1.4. Aszfaltkeverékek testsűrűségének és szabadhézag tartalmának becslése

Az aszfaltrétegek szabadhézag tartalmának ismerete kulcsfontosságú, mivel ezen paraméter nagy mértékben befolyásolja az útpályaszerkezetek várható élettartamát, valamint alakváltozási tulajdonságait [11]. Kutatásaink során erős exponenciális kapcsolatot tártunk fel az aszfaltkeverékek GPR technológia alkalmazásával mért relatív permittivitása és laboratóriumban mért szabadhézag tartalma (AV) között:

$$AV(\%) = \alpha * e^{-\beta \varepsilon_{AC}} + \epsilon \quad (1)$$

ahol AV a szabadhézag, ε_{AC} az aszfalt dielektromos állandója, α és β az anyagfüggő modellparaméterek, ϵ pedig a hibtag [6].

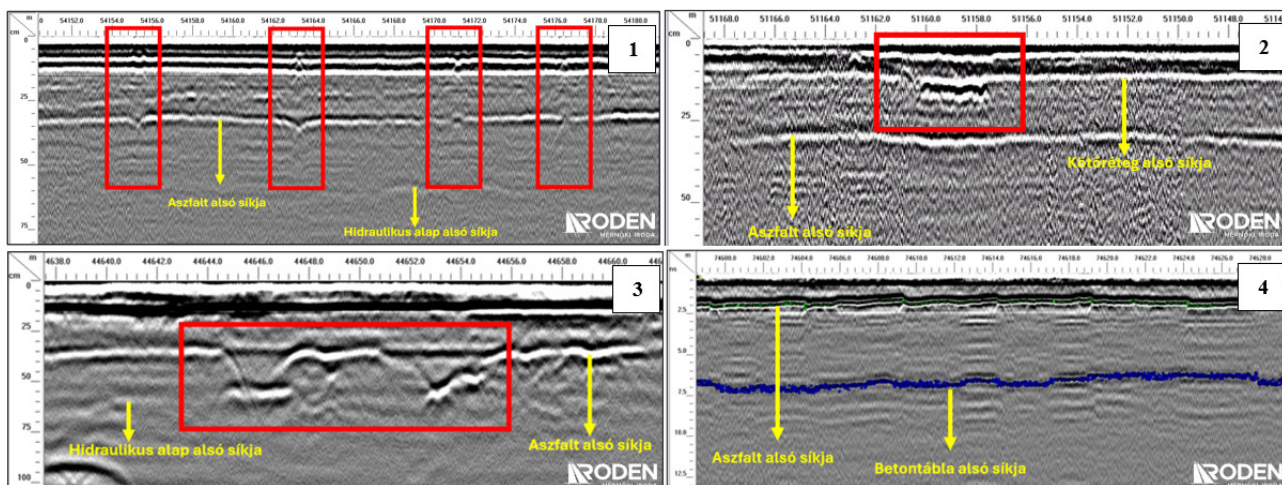
A modellparaméterek megfelelő kalibrációját követően $\pm 1\%$ pontosságú AV értékek becsülhetők a burkolat felszínén, GPR technológia segítségével meghatározott adatokból. A szabadhézag-tartalom ismeretében a réteg helyszíni relatív tömörsége, valamint testsűrűsége is könnyen kiszámítható, így a technológia alkalmas az aszfaltkeverék folyamatos kvantitatív tömörségének meghatározására és a tömörítés minőségének ellenőrzésére. A gyors visszajelzésnek köszönhetően, a hagyományos mintavételezési eljárásokkal gyakran kimutathatatlan lokális hibák nagyrésze még az építés közben kijavítható [6].



5. ábra. A fúrt magminták alapján a dielektromos állandó és a szabadhézag-tartalom között felállított empirikus modellek (bal), GPR adatok alapján szerkesztett relatív tömörség térkép (jobb) [6]

4.1.5. Pályaszerkezeti anomáliák, úthibák azonosítása

A radarvizsgálatok megvalósításával lehetőség nyílik a különböző építési idejű pályaszerkezetek állapotának feltárására és értékelésére is. A radar szelvényképek elemzésével átfogó képet kaphatunk a felszín alatti pályaszerkezeti hibákról és anomáliákról, amelyek egyéb vizsgálati módszerekkel nem, vagy csak véletlenszerűen azonosíthatók. Ezen úthibák közé tartoznak a reflexiós repedések, légüregek, rétegelválások, lokális süllyedések, hézagvasalás nélküli betontáblák esetén a haladási iránynak megfelelően kialakuló táblalépcsők, táblasüllyedések, valamint a felújítás tervezés során kritikus helynek számító szerkezeti határok és építési szakaszhatárok. Ezen adatok információt hordoznak a pályaszerkezet várható élettartamáról, így feltárásukkal a beavatkozások ütemezése és a pályaszerkezet-gazdálkodás racionalizálása megvalósíthatóvá válhat.



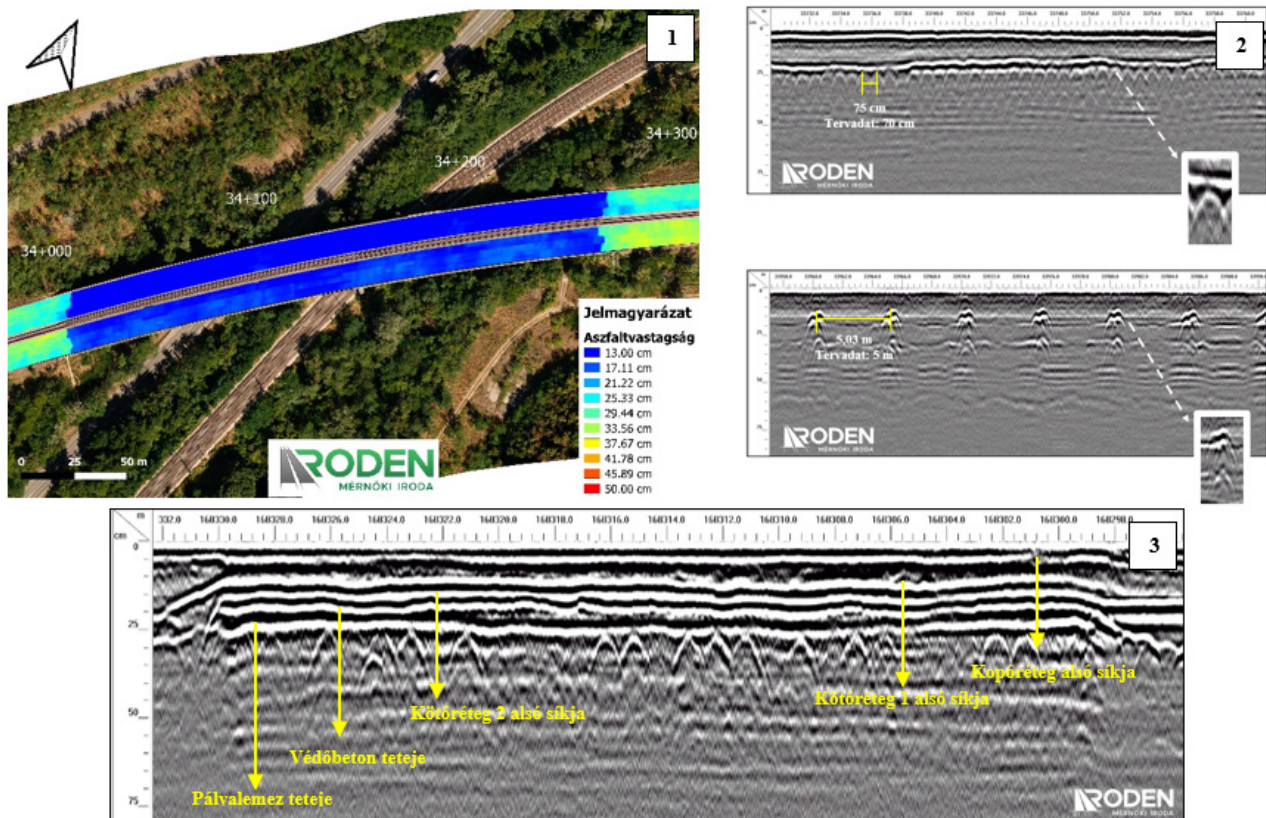
6. ábra. Reflexiós repedések (1), rétegelválás (2), légüregek (3) és táblalépcsők, táblasüllyedések (4) megjelenése a szelvényképeken

4.2. Vasbeton szerkezetek diagnosztikai vizsgálatával szolgáltatott adatok

A különösen nagy forgalmú és jelentős nehézgépjármű forgalom által igénybevett vasbeton szerkezetek felépítésének ismerete, valamint állapotváltozásának nyomon követése alapvető fontosságú az üzemeltetés, a karbantartás és a felújítás tervezés során. Ezen szerkezetek vonatkozásában azonban kiemelten nehéz feladat a szerkezeti- és anyagi információk feltárása, mivel a hagyományos vizsgálati módszerek erre nem, vagy csak korlátozottan alkalmasak [5]. Mindemelllett a diagnosztikai állapotfelmérést olyan vizsgálatokkal kell végrehajtani, amelyek a szerkezetben minimális károsodást okoznak, így nem veszélyeztetik annak integritását és stabilitását.

A vasbeton szerkezetek diagnosztikai vizsgálatára egyre szélesebb körben alkalmazzák a roncsolásmentes georadar technológiát, mivel használatával folytonos információt kaphatunk a hidak

felszerkezetének rétegfelépítéséről, a rétegek vastagságáról, a híd pályalemez tetejének felszínhez viszonyított mélységéről, a vasalás kiosztásáról és betontakarásáról, valamint a rejtett geometriai tulajdonságokról [3]. A szerkezeti felépítésen túl a radartechnológia alkalmas a vasbeton szerkezetek tönkremeneteli zónáinak elkülönítésére is. Ennek fizikai alapja, hogy a kloridok, sók és a nedvesség jelenléte jelentősen megnöveli az anyag elektromos vezetőképességét, ezáltal csökken a réteghatárról visszavert radarjelek amplitúdója [1]. A vasalásokról visszavert radarjelek amplitúdójának ASTM-D6087-22 szabvány szerinti térképezésével és elemzésével lehatárolhatók a korrózió által érintett zónák, amelyek korai feltárással és gyors beavatkozással jelentősen megnövelhető a szerkezet várható élettartama. A technológia előnye továbbá az egyéb roncsolásmentes vizsgálatokkal szemben, hogy aszfaltborítású vasbeton szerkezetek állapotértékelésére is alkalmazható.

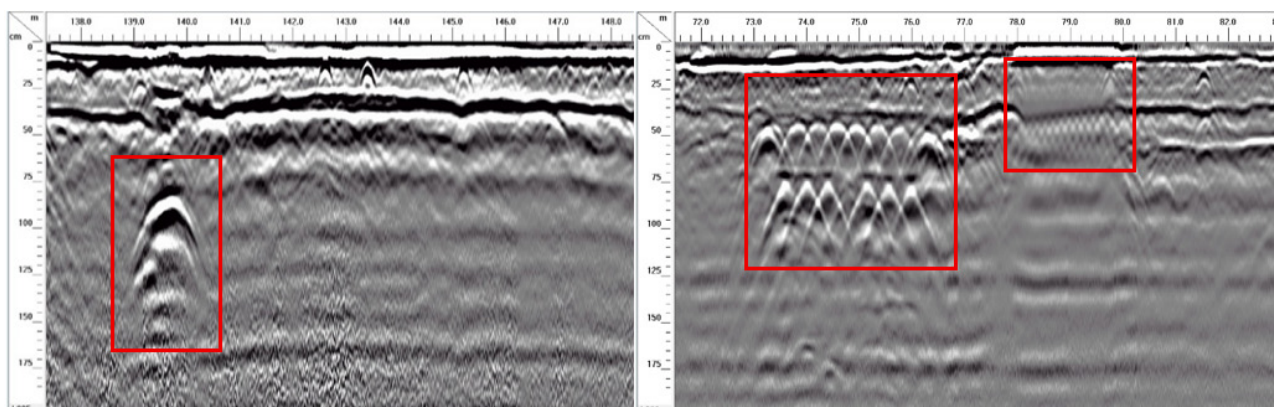


7. ábra. Hídszerkezet összes hengerelt aszfaltvastagságát bemutató hőterkép (1); különböző vasalástípusok megjelenése a radar szelvényképeken (fent – folytonos vasalású, lent – hézagaiban vasalt beton) (2); hídszerkezet szelvényképe és az azon feltárt rétegrend (3)

4.3. Közmű- és objektumfeltárás

A közműhálózatok pontos és naprakész feltérképezése alapvető jelentőséggel bír a városi infrastruktúra biztonságos és hatékony üzemeltetése szempontjából, továbbá elengedhetetlen a fejlesztési és kivitelezési projektek előkészítési fázisában. A gyakorlatban azonban visszatérő probléma, hogy a közműhálózatról rendelkezésre álló információk pontatlanok, hiányosak, vagy még rosszabb esetben egyáltalán nem elérhetők.

A georadar technológia a felszín alatti térrész pontos leképezésével lehetővé teszi a felszín alatti objektumok, üregek, pincék térképezését, valamint a közmű adatbázisokban nem, vagy pontatlanul szereplő közművezetékek és közműalagutak nyomvonalának feltárását [2]. A georadar rendszert globális helymeghatározó rendszerrel integrálva nagy pontosságú, georeferált adatállomány hozható létre a vizsgálati területről. Az így nyert adatok jelentősen hozzájárulnak a tervezési és kivitelezési munkafolyamatok biztonságának növeléséhez, a váratlan káresemények, úgymint kivitelezés közbeni közműátvágások és balesetek bekövetkezési valószínűségének csökkentésével.



8. ábra. Felszín alatti közművezeték (bal) és eltérő módon vasalt közműalagutak megjelenése a radar szelvényképeken (jobb)

5. KONKLÚZIÓK

Jelen cikkben a georadar technológia közúti infrastruktúra diagnosztikájában történő alkalmazásával kapcsolatos ismeretek bővítése céljából, a közel 1400 km hosszúságban elvégzett radarméréseink eredményeire támaszkodva bemutatásra került, hogy milyen széleskörű információszolgáltatás érhető el a georadar használatával. A fenti példák rámutatnak arra is, hogy a radartechnológia nemcsak hasznos, hanem sok esetben nélkülözhetetlen kiegészítője a hagyományos vizsgálati módszereknek, mivel egy átfogó képet ad a felszín alatti térrész szerkezetéről és állapotáról. Olyan rejtett összefüggések és szerkezeti elemek is feltárhatók vele, amelyek más eljárásokkal legfeljebb korlátozottan vagy egyáltalán nem azonosíthatók.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A georadar alapú roncsolásmentes útpályadiagnosztikai módszertan kifejlesztése a RODEN Mérnöki Iroda Kft. által elnyert 2018-1.1.2-KFI-2018-00029 szerződésszámú projekt keretein belül valósult meg.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Azari H. *Condition Assessment of Concrete Bridge Deck Using GPR*. LTB News. Federal Highway Administration, 2016, 6(September), 2–16.
- [2] Bigman D. P. *GPR Basics: A Handbook for Ground Penetrating Radar Users*, Bigman Geophysical, LLC, Sunwanee, GA, USA, 2018.
- [3] Boldrin P. Fornasari G. Rizzo E. *Review of Ground Penetrating Radar Applications for Bridge Infrastructures*. NDT. MDPI, 2024, 2(1), 53–75.
- [4] Daniels J. J. *Ground Penetrating Radar Fundamentals, Appendix to a report to the U.S. EPA, Region V*, Department of Geological Sciences, The Ohio State University, USA, 2000.
- [5] Orbán Z. *Korai vasbeton építmények tartószerkezeti megbízhatóságának megítélése diagnosztikai módszerek alkalmazásával*. BETON. CeMBeton, 2018, XXVI.(5), 20–24.
- [6] Primusz P., Runa B., Balogh O., Tóth Cs. *Új építésű aszfaltrétegek vastagságának és tömörségének meghatározása földradarral*. Útügyi lapok. Makadám 2000 Kft., 2022, 10(16), 38-52.
- [7] Runa B. Balogh O. *Georadar a pályaszerkezet tervezés és gazdálkodás szolgálatában*. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia. EMT, 2025, XXIX., 158-164.
- [8] Saarenketo T. *Using Ground-Penetrating Radar and Dielectric Probe Measurements in Pavement Density Quality Control*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Sage Journals, 1997, 1575(1), 34-41.
- [9] Szentpéteri I. *Útpályaszerkezetek homogén szakaszképzésének tapasztalatai*. Útügyi Lapok. Makadám 2000 Kft., 2014, 2(3), 23–32.
- [10] Topp G. C., Davis J. L., Annan A. P. *Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines*. Water Resources Research. Advancing Earth and Space Sciences, 1980, 16(3), 574-582.
- [11] Zaltuom A. M. *A Review Study of The Effect of Air Voids on Asphalt Pavement Life*. In Proceedings of First Conference for Engineering Sciences and Technology. AIJR Publisher, 2018, 2, 618-25.