



# Új építésű aszfaltrétegek vastagságának és tömörségének meghatározása földradarral

**Primusz Péter<sup>1</sup>, Runa Boglárka<sup>2</sup>, Balogh Olivér<sup>2</sup>,  
Tóth Csaba<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>: Soproni Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Geomatikai és Kultúrmérnöki Intézet

<sup>2</sup>: RODEN Mérnöki Iroda Kft.

<sup>3</sup>: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Út és Vasútépítési Tanszék

E-mail: [primusz.peter@uni-sopron.hu](mailto:primusz.peter@uni-sopron.hu); [runa.boglarka@roden.hu](mailto:runa.boglarka@roden.hu); [balogh.oliver@roden.hu](mailto:balogh.oliver@roden.hu); [toth.csaba@emk.bme.hu](mailto:toth.csaba@emk.bme.hu)

DOI: [10.36246/UL.2022.1.04](https://doi.org/10.36246/UL.2022.1.04)

## KIVONAT

A földradarok (Ground Penetrating Radar, GPR) alkalmazhatósága az útpályaszerkezet diagnosztikában közismert és elismert, a segítségükkel roncsolásmentesen nyerhető információk ma már számos PMS rendszer fontos input adatát képezik.

Az eszköz a hazai szakmai közvélemény előtt sem ismeretlen, azonban alkalmazhatóságával kapcsolatban alapvetően a pályaszerkezeti rétegek vastagságának - többé-kevésbé pontos - meghatározhatósága él a köztudatban. Jelen cikkben ezen ismeretek bővítésére törekedve, egy olyan mérésorozat eredményeit ismertetjük, amelyek a rétegvastagság meghatározása mellett, a burkolati rétegek tömörségi viszonyainak vizsgálatára is kiterjednek.

A kapott eredmények nemcsak atekintetben biztatóak, hogy a fűrt mintavételre alapuló rétegvastagság kiváltására is alkalmas eszközről beszélhetünk, hanem az épített rétegek tömörségének térbeli alakulása is – megnyugtató pontossággal - elemezhető.

*Kulcsszavak:* GPR, aszfaltréteg vastagság, aszfaltréteg tömörség, felületi visszaverődésen (reflexión) alapuló módszer

## ABSTRACT

The applicability of ground penetrating radars (GPR) in pavement diagnostics is well known and recognized, and the non-destructive information obtained with their help is now a vital input data of many PMS systems.

The tool is not unknown to the Hungarian professional public either, however, in relation to its applicability, the ability to determine the thickness of the pavement structure layers - more or less accurately - in common knowledge. In this article, in an effort to expand this knowledge, we present the results of a series of measurements which, in addition to determining the layer thickness, also cover the examination of the compactness conditions of the pavement layers. The obtained results are not only encouraging since it is a tool that suitable for determining the layer thickness based on drilled sampling, but also the spatial development of the compactness of the built layers can be analyzed - with reassuring accuracy.

*Keywords:* GPR, asphalt layer thickness, asphalt layer compactness, surface reflection method

### **Dr. Primusz Péter**

*A Soproni Egyetem (SOE) Erdőmérnöki Karán a Geomatikai, Erdőfeltárási és Vizgazdálkodási Intézet munkatársa. Fő kutatási területe az útfenntartás és az útpályaszerkezetek méretezése, megerősítése.*

**Runa Boglárka**

*A RODEN Mérnöki Iroda Kft. okleveles geológus munkatársa. Fő kutatási területe a Georadar technológia roncsolásmentes útpályadiagnosztikai alkalmazásának vizsgálata.*

**Balogh Olivér**

*A RODEN Mérnöki Iroda Kft. okleveles geológus munkatársa. Fő kutatási területe a Georadar technológia roncsolásmentes útpályadiagnosztikai alkalmazásának vizsgálata.*

**Dr. Tóth Csaba**

*A Magyar Mérnöki Kamara, a Közlekedéstudományi Egyesület, a Magyar Útügyi Társaság Útpályaszerkezetek Szakbizottság tagja, jelenleg az BME Út és Vasútéptérségi Tanszék docense. Korábban a Csongrád Megyei Állami Közútképző Kht., illetve az Állami Közúti Műszaki és Információs Kht. osztályvezetőjeként a magyar útügyi adminisztrációban dolgozott. Később a Strabag Konzern mérnökeként részt vett az épülő hazai országos közúthálózat minőségellenőrzésében, valamint a Konzern nemzetközi és hazai kutatásaiban. Közlekedési építőmérnöki szakértőként, tervezőként, illetve műszaki ellenőrként közreműködött számos hazai burkolat-megerősítési projektben. Kutatási területe: hajlékony útpályaszerkezetek igénybevétele, méretezése, teherbíró-képessége, megerősítése.*

---

## 1. BEVEZETÉS

A roncsolásmentes vizsgálatok fő előnye abban rejlik, hogy gyorsan és zavarásmentesen lehet nagymennyiségű mérést úgy végrehajtani, hogy közben nem okozunk kárt a vizsgált szerkezetben. Ez utóbbi tulajdonság főleg új építésű útpályaszerkezeteknél különösen fontos, ahol nem lehet „szétfúrni” a beépített rétegeket az építési minőség ellenőrzése érdekében sem. Az útpályaszerkezet diagnosztikában alkalmazható roncsolásmentes vizsgálatok részletes áttekintése megtalálható [1] munkájában, valamint magyar nyelven [2] összefoglalóját javasoljuk átolvasásra. A cikkben felsorolt eszközök és eljárások közül mi most csak a földradar (Ground Penetrating Radar, GPR) mérés technológiával foglalkozunk. Az eljárás nem csak leromlott állapotú útszakaszok kiértékeléséhez, hanem újépítésű szakaszok minőségellenőrzéséhez is kiválóan felhasználható (sőt, inkább erre használják leginkább), mivel képes a forgalom zavarása nélkül nagymennyiségű folytonos térbeli adathalmazt összegyűjteni. A folytonos mérés azért különösen fontos és hasznos, mivel a lokális pontokban (a 25–50 vagy akár 500–1000 m-es szelvénytávolságokban) meghatározott szerkezeti adatok térbeli kiterjesztése egyáltalán nem egyértelmű és könnyű feladat, nem is beszélve azok „valós” átlagos értékének meghatározásáról. A hagyományos mintavételezési eljárásokkal a lokális hibák kimutathatatlanok, pedig azok nagyrésze még az építés közben kijavítható lenne, ha elég gyorsan kap visszajelzést a kivitelező. Cikkünkben ezért a földradar alkalmazhatóságát vizsgáljuk a minőségellenőrzés területén.

## 2. ELMÉLETI HÁTTÉR

A földradar műszer jellemzően egy adó és egy vevő antennából, egy adatgyűjtő és vezérlő egységből, egy mérőkerékből és opcionálisan egy GPS-ből áll. A földradar adó része nagyfrekvenciás elektromágneses impulzusok sorozatát bocsátja ki. A hullámok a vizsgált közegben részben elnyelődnek, részben visszaverődnek [3]. A visszaérkező jelet (feszültséget) a vevő egység veszi az idő függvényében, digitalizálja és az adatrögzítő egység tárolja [4]. A radarjel terjedése a vizsgált közeg elektromos és mágneses tulajdonságaitól függ. Ezek közül a két legjellemzőbb, a dielektromos állandó (permittivitás) és a vezetőképesség (konduktancia). Az aszfaltrétegek in-situ  $\epsilon_r$  relatív dielektromos állandóját megkapjuk a felületi visszaverődés (Surface Reflection, SR) módszerét alkalmazva [5]. A felületi visszaverődésen (reflexión) alapuló módszer azt használja ki, hogy a visszavert jel amplitúdója annál nagyobb, minél nagyobb a kontraszt a réteghatár két oldalán található anyag fizikai,

elektromágneses tulajdonságaiban. A reflexiók együttható ( $R$ ) – elhanyagolva a vezetőképességet – az alábbi képlettel számítható [6]:

$$R = \frac{\text{Visszaverődő hullám amplitúdója}}{\text{Beeső hullám amplitúdója}} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad (1)$$

ahol  $\varepsilon_1$  és  $\varepsilon_2$  az egymást követő rétegek dielektromos állandói. Az útpályaszerkezetre beeső hullám amplitúdóját ( $A_p$ ) megkapjuk, ha egy rendkívül reflektív rézlemezt helyezünk a GPR antenna alá, ami tökéletesen visszasugározza a vevő felé a kibocsájtott jelet. A rézlemezt eltávolítva az antenna alól, és egy újabb mérést végrehajtva megkapjuk a kopórétegről visszaverődő hullám ( $A_0$ ) amplitúdóját. Felhasználva ezeket az adatokat és figyelembevéve, hogy a levegő dielektromos állandója 1, az (1) egyenlet átrendezésével megkapjuk a keresett  $\varepsilon_r$  összefüggését:

$$\varepsilon_r = \left[ \frac{1 + (A_0/A_p)}{1 - (A_0/A_p)} \right]^2 \quad (2)$$

ahol  $\varepsilon_r$  a felső aszfaltréteg dielektromos állandója,  $A_0$  az aszfaltréteg felületéről visszaverődő hullám amplitúdója,  $A_p$  pedig a rézlemezről visszaverődő hullám amplitúdója. A relatív  $\varepsilon_r$  dielektromos állandó ismeretében pedig már lehetőség nyílik egy adott réteg vastagságának kiszámítására:

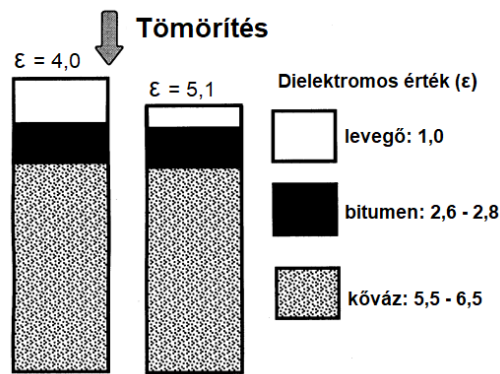
$$h_i = \frac{c\Delta t}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (3)$$

ahol  $c$  a fénysebesség (0,30 m/ns),  $\Delta t$  az  $A_0$  és  $A_p$  amplitúdók közötti kétirányú futási idő, és  $\varepsilon_r$  az anyag relatív dielektromos állandója. Így a radarmérés időtengelye mélységmetszette alakítható. Amennyiben viszont ismert a  $h_i$  rétegvastagság (pl. fúrás által) akkor az  $\varepsilon_r$  dielektromos állandó határozható meg igen pontosan a (3) egyenletből.

Az útpályaszerkezetet felépítő rétegek dielektromos állandójára vonatkozóan vannak irodalmi adatok (aszfalt: 4–8; beton: 9–11), amelyek alkalmazásával könnyen, fűrómagminta nélkül kiszámíthatjuk a rétegvastagságokat. A módszer nehézsége, hogy a dielektromos állandó az útépitési anyagoknál változó lehet, amire a nedvességtartalom, az ásványi összetétel, a hőmérséklet, a tömörség és a mérőfrekvencia egyaránt hatást gyakorol. Ez azzal magyarázható, hogy az útépitésben használt anyagok (talaj, zúzottkő, aszfalt, beton stb.) kémiai szempontból háromfázisú diszperz rendszerek, amikben a folyadék- és gázfázis aránya az időjárási tényezőktől nagymértékben függ. Ennek köszönhetően viszont a földradar mérések nem csak a rétegvastagságok meghatározására alkalmasak, hanem az aszfaltkeverékek testsűrűségének és szabadhézag-tartalmának megbecslésére, a földműanyagok tömörségének és nedvességtartalmának monitorozására, valamint az úthibák pl. repedések detektálására is [7] [8] [9] [10]. További hasznos részletek olvashatóak az útpályaszerkezetek földradarral történő roncsolásmentes vizsgálati lehetőségeiről [11], valamint [12] magyar nyelvű cikkében.

Saarenketo (1997) [13] volt az egyik első kutató Európában, aki földradart használt az aszfalt-pályaszerkezetek sűrűségének mérésére. Kutatásai szintén azon az elven alapultak, hogy a pályaszerkezet dielektromos állandója feltételezhetően, az összetevőinek dielektromos állandóinak a függvénye. Ezért az összetevők (fázisalkotók) térfogatarányaiban bekövetkező változások kimutathatóak a teljes pályaszerkezet dielektromos állandójának mérésével.

Az aszfaltkeverék összetevői közé tartozik a bitumen, az ásványi adalékanyag, a levegő és esetlegesen a víz (lásd 1. ábra). A bitumen dielektromos állandója általában 2,6 és 2,8 közötti tartományba esik, a zúzott száraz aggregátumok állandói 5,5 és 6,5 között változnak, a levegőé pedig 1. Bár a víz dielektromos állandója függ annak kémiai értelemben vett kötöttségi fokától, kijelenthető, hogy a víznek az új pályaszerkezet dielektromos állandójának mérésére nincs érzékelhető hatása.



1. ábra. A tömörítés hatását a dielektromos állandóra [13].

Laboratóriumi vizsgálatokkal korrelációs kapcsolatot kerestek a finn útügyi kutatók a száraz aszfaltkeverék dielektromos állandója és annak testsűrűsége között. A finn kutatások arra a következtetésre mutattak, hogy az útburkolat dielektromos állandója és annak szabadhézag-tartalma ( $V_A$ ) között exponenciális kapcsolat van:

$$V_A(\%) = a \cdot e^{-b \cdot \varepsilon_{AC}} \quad (4)$$

ahol  $\varepsilon_{AC}$  az aszfaltburkolat dielektromos állandója (GPR antennarendszerrel meghatározható),  $a$  és  $b$  kalibrációs együtthatók, amelyek a keverék típusától függenek, és a helyszíni mérés közben vett magmintából meghatározhatóak. Különböző utakról gyűjtött GPR adatok bizonyították, hogy a dielektromos állandó értékének csökkenése sűrűségproblémákat jelez (lásd 1. ábra). A tanulmány által kimutatott legjelentősebb tény, hogy a GPR óriási lehetőségeket kínál a helyi problémák monitorozásában [14].

### 3. ANYAG ÉS MÓDSZER

A földradar méréstechnika lehetőségeit a minőségellenőrzés területen egy délföldi lakóútca 220–240 m hosszú kísérleti útszakaszán vizsgáltuk meg. Méréseinket elsősorban a beépített aszfaltrétegek előírt vastagságának és azok szabadhézag-tartalmának ellenőrzésére kívántuk felhasználni.

A kutatáshoz a földradar mérőrendszert a RODEN Mérnöki Iroda biztosította. A GSSI gyártmányú 1 GHz és 2 GHz frekvenciájú levegőcsatolt antennák a hordozó gépkocsi mögött 1,5 méterre, a burkolat felszíne felett pedig kb. 450 mm-re helyezkedtek el. Az antennák pontos elrendezését a 2. ábra mutatja be. A terepi mérés 16 km/h sebességgel, és méterenként 50 db letapogatással történt. A nyers adatokat a nagysebességű SIR-30 többcsatornás adatgyűjtő és vezérlőrendszer rögzítette. A begyűjtött adatok közül tanulmányunkban most csak a jobb felbontású 2 GHz-es antennák RADAN szoftverrel feldolgozott eredményeit értékeljük. Ennek háttérben az áll, hogy az FZKA rétegre került 3–4 cm vastagságú kiékelő/kiegyenlítő szemcsés réteget folytonosan csak a 2 GHz-es antennák által észlelt szelvényeken tudtuk azonosítani. A RADAN7 szoftverből kiexportált rétegvastagságokat végül Microsoft Excel programmal halmozott terület diagramokon ábrázoltuk.

A beépített aszfaltrétegeket nem csak a levegőcsatolt antennákkal, hanem a PaveScan RDM 2.0 (második generációs) roncsolásmentes aszfaltsűrűség-értékelő mérőberendezéssel is megvizsgáltuk (3. ábra). A PaveScan berendezés alapvetően a vizsgált aszfaltkeverék dielektromos tulajdonságait méri és abból következtet a testsűrűsége. A készülék 3 darab egymástól tetszőleges (de maximum 1,1 m) távolságra elhelyezhető 2 GHz középfrekvenciájú levegőkapcsolt antennával (érzékelővel) van felszerelve az útpálya felületének minél teljesebb lefedése érdekében.



2. ábra. A RODEN Mérnök Iroda „RoadScan” rendszere.



3. ábra. A RODEN Mérnök Iroda PaveScan RDM 2.0 (második generációs) roncsolásmentes aszfaltsűrűség-értékelő mérőberendezése a levegő (bal) és a fémlemez kalibráció (jobb) közben.

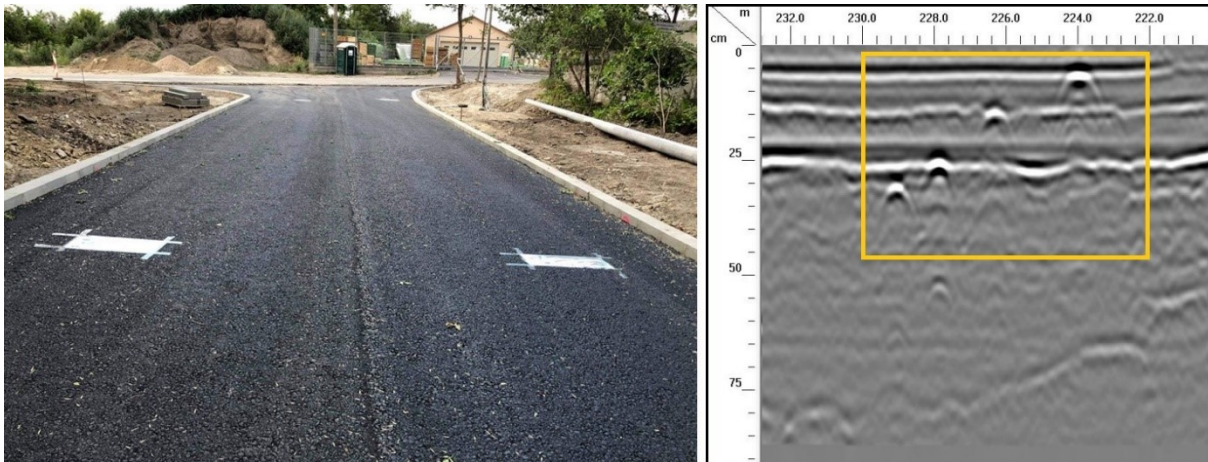
A szenzorok 30 cm magasságban vannak rögzítve a felszín felett. A szenzorok a felületi visszaverődés (SR) módszer alapján, automatikusan kiszámítják az aszfalt adott pontjára vonatkozó dielektromos állandót. A mérőműszer méterenként 40 letapogatást végez, amelynek köszönhetően nagy felbontású dielektromos állandó meghatározást tesz lehetővé. A mérést megelőzi az úgynevezett levegő kalibráció, melynek célja a háttérzajok eltávolítása, valamint a fémlemez kalibráció, melynek célja az aszfalt felszínének, valamint a fémlemezről visszavert hullám amplitúdójának detektálása.

A mérőműszerek rövid bemutatásából kiemeljük, hogy mind a két földradar 2 GHz középfrekvenciájú levegőkapcsolt antennákkal dolgozik, amik a felszín felett közel azonos 30–45 cm magasságban helyezkednek el. Ezért a két mérőberendezés által meghatározott dielektromos állandókat jelentősen sem a mérési magasság, sem a mérési frekvenciákból származó különbségek nem terhelhetik.

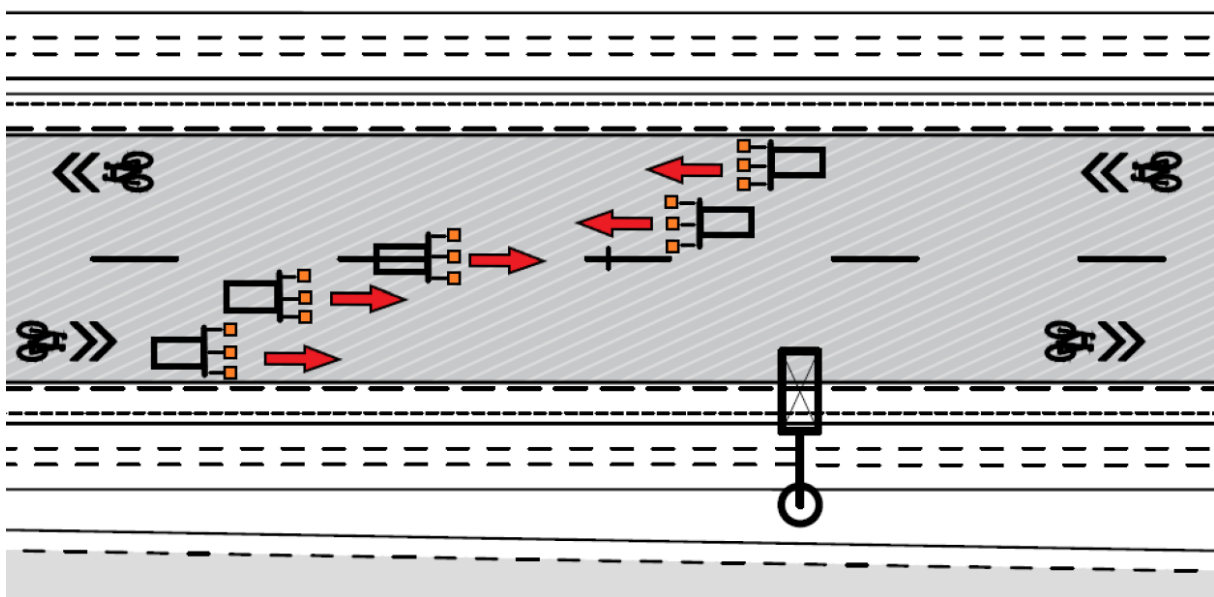
A kutatásban vizsgált két forgalmi sávú lakóútca tervezett útpályaszerkezetének felépítése az alábbi volt:

1. 4,0 cm AC 11 kopó (F) réteg
2. 7,0 cm AC 22 kötő (F) réteg
3. 8,0 cm AC 22 alap (F) réteg
4. 20,0 cm FZKA 0/63 szórt alap (3-4 cm vastag 0/22 szemcsés réteggel eltakarva)
5. 20,0 cm homokos kavics védőréteg





4. ábra. Az aszfalt kötő- és alaprétegen elhelyezett antipólusok (bal) és az egyes rétegek közé egymástól 1 méterrel elcsúsztatva lehelyezett antipólusok megjelenése a radarszelvényen (jobb).



5. ábra. A lakóútcán történt felmérések vázlatrajza.

A kísérleti útszakasz pályaszerkezetének építése közben lehetőség nyílt 20 méterenként az aszfaltrétegek alá egymástól 1 méterrel eltolva antipólusokat elhelyezni (4. ábra). Erre a célra a könnyen beszerezhető háztartási alumínium fóliát választottuk, de a 2-3 mm vastag fémlemez is megfelelő eredményt ad. Az antipólusok a GPR által kibocsájtott hullámenergiát teljesen visszaverik, ezért az aszfaltréteg aljának pontos helye parabola alakú visszaverődés képében azonosítható a radarszelvényen. Megjegyzendő, hogy ezek az alumínium fóliák a gyakorlatban nem szükségesek a GPR mérésekhez, csak a kutatási eredmények validálására szokás használni.

Mind a két földradar berendezéssel három mérést hajtottunk végre a teljes kísérleti útszakaszon. Az első (1) mérés az AC 22 aszfalt alapréteg beépítése után, a második (2) mérés az AC 22 aszfalt kötőréteg beépítése után, végül a harmadik (3) mérés az AC 11 aszfalt kopóréteg beépítés után történt meg. A rétegenkénti méréseknek köszönhetően valamennyi aszfaltréteg dielektromos állandójáról információt kaptunk. A teljes útpálya lefedése érdekében sávonként két mérés történt, egy a sávszélen (a szélső szenzor padka mellett), egy pedig a sávközépen (a szélső szenzor az úttengely mellett). A részletesebb adatgyűjtés érdekében a mérések kiegészültek egy úttengely menti felméréssel is (5. ábra).



6. ábra. A fűrt magminták elhelyezkedése az alaprétegen.

A vizsgált útpályaszerkezet rétegeinek vastagságát meghatároztuk a GSSI gyártmányú 2 GHz frekvenciájú levegőcsatolt antennák által gyűjtött adatokból, mivel itt elsősorban a beépített antipólusokra támaszkodtunk (4. ábra). A beépített aszfaltrétegek testsűrűségének megbecsléséhez viszont már az erre a célra kifejlesztett PaveScan RDM 2.0 eredményekből indultunk ki. A földradar mérések validálásához fűrt magmintákat használtunk. Az aszfalt alapréteg beépítését követően 3–3, az aszfalt kötőréteg beépítését követően pedig újabb 3–3 fűrómag került kivételre a jobb és bal sávban egymástól kb. ~70 méterenként (6. ábra). A fűrt magminták rétegvastagságát az MSZ EN 12697-36:2003 szabvány szerint, míg a testsűrűségeket az MSZ EN 12697-6:2012 szabvány szerint megállapítottuk. A térfogati jellemzők keveréktervezési kritériumként, vagy a keveréknek az útpályaszerkezetbe való terítése és tömörítése utáni kiértékelési paramétereként használatos. A beépített aszfaltkeverékek legfontosabb jellemzői az alábbiak voltak: AC 11 kopóréteg hézagmentes  $G_{mm}$  testsűrűsége  $2436 \text{ kg/m}^3$ . AC 22 alap- és kötőréteg hézagmentes  $G_{mm}$  testsűrűsége  $2572 \text{ kg/m}^3$  és  $2580 \text{ kg/m}^3$ . A kötőanyag súly szerinti aránya 4,1%, relatív sűrűsége  $1050 \text{ kg/m}^3$ , a felhasznált kőváz hézagmentes testsűrűsége pedig  $2759 \text{ kg/m}^3$ .

A kutatás további részében korrelációt kerestünk a mért  $\epsilon_{AC}$  dielektromos állandó és az aszfaltréteg  $G_{mb}$  testsűrűsége között. Mivel a szabadhézag-tartalom a következő összefüggés szerint számítandó:

$$V_A(\%) = 100 \cdot \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \quad (5)$$

a (4)-es számú képlet exponenciális függvénye jó választásnak tűnt erre a célra, mivel ha ismerjük  $V_A$ -t, akkor a fenti képletből  $G_{mb}$  értéke könnyen kifejezhető:

$$G_{mb} = (1 - V_A) \cdot G_{mm} \quad (6)$$

A modell paramétereinek meghatározásához az eredeti (4) exponenciális függvényt a következő formában alkalmaztuk:

$$V_A(\%) = \alpha \cdot e^{-\beta \cdot \epsilon_{AC}} + \epsilon \quad (7)$$

ahol  $V_A$  a szabadhézag,  $\epsilon_{AC}$  az aszfalt dielektromos állandója,  $\alpha$  és  $\beta$  a keresett modellparaméterek,  $\epsilon$  pedig a hibtag. A hibtag megjelenése a modellben azt jelenti, hogy a dielektrikumon kívül más tényezők is befolyásolhatják a szabadhézag-tartalom előrejelzésének pontosságát, amelyek közé tartozhat a modell hibája, az anyagok és a környezet, például a hőmérséklet vagy a nedvességtartalom változékonysága.





7. ábra. A magminták laboratóriumi dielektromos állandó mérése a PaveScan RDM 2.0 mérőműszerrel.

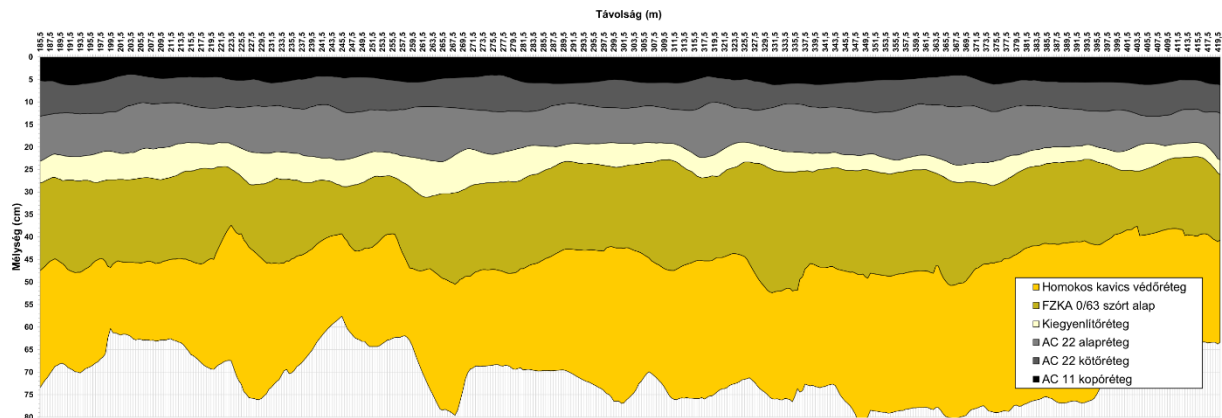
A modell kalibrálásához fúrómag mintavételre, vagy az adott aszfaltkeverékből előállított gyrtoros próbatestekre van szükség [15]. A vizsgált lakóutca AC 22 alap- és kötőrétegéből sikerült fúrt mintákat venni, viszont ezek az AC 11 kopóréteg esetében nem álltak rendelkezésünkre. Ezért a kalibrációhoz a BME laboratóriumában gyrtoros próbatesteket készítettünk, majd meghatároztuk ezek testsűrűségét és dielektromos állandóját a PaveScan RDM 2.0 készülékkel (7. ábra). A helyszíni és laboratóriumi adatok már lehetővé tették, hogy a (7)-es képlet modellparamétereit az átlagos négyzethiba gyökének (Root Mean Square Error, RMSE) minimalizálásával meghatározzuk, majd a dielektromos állandókat átszámítsuk testsűrűsége vagy szabadhégzag-tartalomra. A terepi mérések után a PaveScan RDM 2.0 eszközből 0,5 méterenként kiexportáltuk a dielektromos állandó értékeket a sávszegélytől az úttengely felé haladva a következő szenzorpozíciókban: 2,9 m; 2,3 m; 1,7 m; 1,3 m; 0,7 m; 0,6 m; 0,1 m és 0 m. Az így előállított térbeli dielektromos állandókból végül a Surfer 14 szoftverrel készítettünk szintvonalas sűrűségterképeket.

#### 4. EREDMÉNYEK ÉS MEGVITATÁSUK

A következőkben bemutatjuk és megvitatjuk a vizsgált lakóutca aszfalt rétegein végrehajtott földradarméréseink eredményeit, tapasztalatait. Elemzésünket a vastagságméréssel kezdjük, mivel ez az egyik legkézzelfoghatóbb minőségi paraméter, aminek teljesülnie kell. Vastagság minősítési jellemzőnél az előírt érték a tervezett vastagság. Az aszfaltrétegek vastagságának előírt és megfeleléségi határai részben a mintaszámától függenek (e-ÚT 06.03.21/M1). Ha a mintaszám  $\geq 10$  db, akkor az átlagos rétegvastagság legalább érje el az Előírt érték-6%-ot. Az átlag vastagság megfeleléségi határértéke ekkor az Előírt érték-12% a hivatkozott szabályozás szövege szerint.

Az első (1) AC 22 aszfalt alaprétegen történt mérések eredményei azt mutatták, hogy a radarszelvényeken valamennyi beépített réteg egyértelműen elkülönült egymástól. A nagy pontosságú rétegazonosítást segítették a kiegyenlítő- és az aszfalt alapréteg alatt elhelyezett antipólusok, melyek egymástól 1 méterrel eltolt hiperbolák formájában megjelentek a radarképen (4. ábra jobb oldala). Az előzetes elvárásoknak megfelelően a szemcsés kiegyenlítő réteg és az AC 22 aszfalt alapréteg vastagsága a hossz-szelvények mentén nem változik jelentősen (a vastagságadatok szórása  $\pm 1$  cm), így ezen réteghatárok közel egyenes lefutásúak. Az AC22 aszfalt alapréteg előírt (8 cm) vastagságához képest a földradar +6,3%-os eltérést mutatott ki.





8. ábra. A vizsgált lakóútca jobb sávjában a kopórétegen történt 3. felmérés eredményei alapján szerkesztett vastagság hossz-szelvény (4. csatorna – útszegélyhez közelebb eső 2 GHz-es antenna).

1. táblázat. A három aszfaltréteg vastagságmérésének összefoglalása.

#	Rétegrend	Tervezett vastagság (cm)	CH2 (2GHz)				CH4 (2GHz)			
			Átlag (cm)	Szórás (cm)	N (db)	Eltérés (%)	Átlag (cm)	Szórás (cm)	N (db)	Eltérés (%)
1	AC 22 alap (F)	8	8,5	0,98	461	-6,3	8,5	1,08	464	6,2
	Kiegyenlítő réteg	4	3,9	0,98	409	+1,3	4,0	1,04	335	0,2
	FZKA 0/63 szórt alap	20	19,2	3,19	266	+4,1	20,0	2,92	140	0,1
	Homokos kavics vr.	20	23,4	5,58	281	-17,1	23,0	4,40	161	15,0
2	AC 22 kötő (F)	7	6,4	1,15	462	+8,1	6,5	0,98	470	7,3
	AC 22 alap (F)	8	9,1	1,09	446	-13,5	9,6	1,13	448	20,2
	Kiegyenlítő réteg	4	4,0	1,07	378	+0,3	4,4	1,41	418	10,1
	FZKA 0/63 szórt alap	20	19,1	3,45	315	+4,3	18,4	3,37	325	7,9
3	Homokos kavics vr.	20	21,6	6,22	368	-8,2	23,9	4,85	340	19,7
	AC 11 kopó (F)	4	4,8	0,70	479	-18,9	5,2	0,70	479	30,8
	AC 22 kötő (F)	7	6,5	0,84	479	+7,2	6,3	0,97	447	10,1
	AC 22 alap (F)	8	9,0	1,43	479	-13,1	9,6	1,67	447	19,5
	Kiegyenlítő réteg	4	4,6	1,27	439	-14,9	5,0	1,58	467	24,9
	FZKA 0/63 szórt alap	20	17,0	2,69	284	+15,0	19,0	3,36	292	4,8
	Homokos kavics vr.	20	25,0	7,89	275	-25,1	26,4	5,83	301	31,9

Az FZKA 0/63 szórt alap és a homokos kavics védőréteg esetén már jóval magasabb a vastagságadatok szórása ( $\pm 3-5$  cm), és így a rétegek lefutása is változatosabb.

A második (2) AC 22 aszfalt kötőrétegen történt mérések eredményei nagymértékben hasonlítottak az elsőhöz (1). Az AC 22 aszfalt alap- és kötőréteg vastagsága a hossz-szelvények mentén nem változik jelentősen (a vastagságadatok szórása  $\pm 1$  cm), így ezen réteghatárok közel egyenes lefutásúak voltak. Az AC 22 aszfalt kötőréteg vastagsága az előírt 7 cm-től  $-7,7\%$ -ban eltért. A földradar viszont az AC 22 aszfalt alaprég vastagságára már  $+17\%$ -os eltérést mutatott ki a tervezett vastagsághoz képest, ami magasabb, mint az első (1) méréskor kimutatott  $+6,3\%$ -os érték.

A harmadik (3) utolsó mérés az AC 11 aszfalt kopórétegen történt, és az eddigiekhez hasonlóan a radarszelvényeken valamennyi beépített réteg egyértelműen elkülönült egymástól (8. ábra). Az AC 11 aszfalt kopó- és AC 22 kötőréteg vastagsága a hossz-szelvények mentén nem változik jelentősen (a vastagságadatok szórása  $\pm 0,8$  cm), így ezen réteghatárok közel egyenes lefutásúak. Az AC 22 aszfalt alaprég lefutása is egyenes, de már magasabb  $\pm 1,5$  cm-es szórás jellemzi az átlagos vastagságot. Az AC 11 aszfalt kopóréteg 4 cm-es előírt vastagságához képest a földradar átlagosan 5 cm-es vastagságot becsült, ami  $+25\%$ -os eltérést jelent. Az AC 22 aszfalt kötőréteg eltérés  $-8,6\%$  míg az AC 22 aszfalt alaprégé  $+16,3\%$  volt ezen felmérés szerint.

Az 1. táblázat alapján jól látható, hogy a három eltérő időpontban végrehajtott földradar felmérések, minden rétegre háromféle átlagos rétegvastagságot határoztak meg. A földradar vastagságmérés eredményeinek validálásához ezért a jobb és a bal sávból 3-3 fűrómag mintavétel történt a kötőréteg

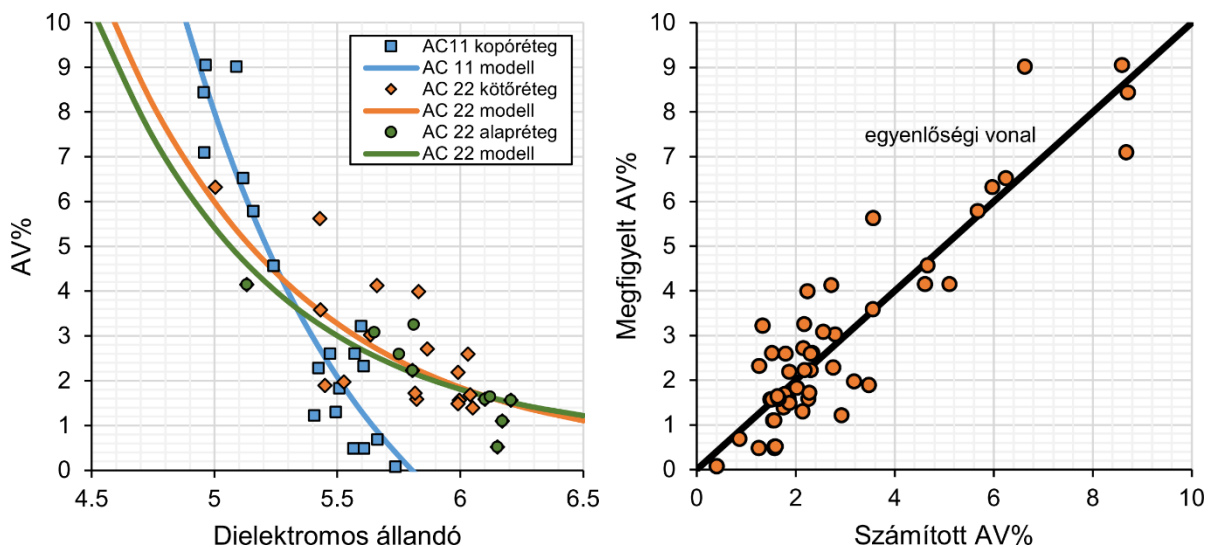
beépítését követően. A kopóréteg beépítése után nem történt már a teljes aszfaltvastagságot feltáró fúrómag mintavétel, csak 1 db magot fúrtak a bal sávból, amely kizárólag a kopóréteget tartalmazta. Ennek következtében a kopórétegen történt GPR mérések érvényesítéséhez a kötőrétegből vett 6 db fúrómag vastagsáadatait és a fent említett 1 db fúrómag mélységadatát tudtuk felhasználni. Ezek után a három aszfaltréteg georadar felmérések alapján meghatározott vastagságának a fúrómagokon azonosított rétegvastagságokkal történő összehasonlítását a 2. táblázat tartalmazza.

Az eredményeket elemezve megállapítható, hogy a georadarral becsült AC22 aszfalt alapréteg vastagságát a fúrómagokhoz viszonyítva az első (1) mérésből átlagosan 1,4%; a másodikból (2) mérésből 1,9%; a harmadik (3) mérésből számolva pedig 6,5% hiba terhelt. Az AC 22 kötőréteg vastagságát a második (2) mérésből átlagosan 3,2%-os; a harmadikból (3) pedig 8,1%-os hibával lehetett meghatározni. Az AC 11 kopóréteg vastagságmérésének átlaghibája az 1 db feltárás alapján 2–8,5% közé tehető. A harmadik (3) kopórétegen történt felmérés eredményeiből számított átlagos eltérések nagyobbak, mint a kötő és alaprétegen történt mérések esetében kapott eltérések. Ennek háttérben a nedvesebb mérési körülmények állhatnak, mivel a kivitelező a burkolat mielőbbi forgalomhelyezhetősége érdekében – a mérést közvetlenül megelőzően – locsolta a kopóréteget és a kopórétegre, illetve a felületre jutó víz befolyásolta a dielektromos állandó értékét.

Mindent figyelembe véve elmondható, hogy a tervezett vastagsági értékek kontroljaként a georadaros rétegvastagság meghatározás pontossága eléri a fúrásokkal történő ellenőrzés megbízhatóságát.

2. táblázat. A földradar vastagságmérések és a fúrt magminták adatainak összefoglalása.

#	Szelvény	Réteg	Sáv	CH2 (cm)	CH4 (cm)	Fúrás (cm)	CH2 Hiba (%)	CH4 Hiba (%)
1	260	AC 22 alap (F)	Jobb	8,89	8,97	8,85	0,5	1,4
	300	AC 22 alap (F)	Jobb	8,20	8,25	8,30	1,2	0,6
	370	AC 22 alap (F)	Jobb	8,78	8,84	8,95	1,9	1,2
	260	AC 22 alap (F)	Bal	7,98	8,04	8,10	1,5	0,7
	300	AC 22 alap (F)	Bal	7,64	7,87	7,70	0,8	2,2
	370	AC 22 alap (F)	Bal	7,31	7,66	7,50	2,5	2,1
2	260	AC 22 alap (F)	Jobb	8,90	8,75	8,85	0,6	1,1
	300	AC 22 alap (F)	Jobb	8,65	8,30	8,30	4,2	0,0
	370	AC 22 alap (F)	Jobb	8,90	8,92	8,95	0,6	0,3
	260	AC 22 alap (F)	Bal	8,34	8,34	8,10	3,0	3,0
	300	AC 22 alap (F)	Bal	7,58	7,19	7,70	1,6	6,6
	370	AC 22 alap (F)	Bal	7,55	7,55	7,50	0,7	0,7
	260	AC 22 kötő (F)	Jobb	5,94	6,69	6,40	7,3	4,5
	300	AC 22 kötő (F)	Jobb	6,06	5,73	6,10	0,7	6,1
	370	AC 22 kötő (F)	Jobb	5,82	5,42	5,60	3,9	3,2
	260	AC 22 kötő (F)	Bal	6,40	6,42	6,60	3,0	2,7
	300	AC 22 kötő (F)	Bal	6,76	6,68	6,80	0,6	1,8
	370	AC 22 kötő (F)	Bal	7,82	7,45	7,80	0,3	4,5
3	260	AC 22 alap (F)	Jobb	8,37	8,87	8,85	5,4	0,2
	300	AC 22 alap (F)	Jobb	8,83	7,75	8,30	6,4	6,6
	370	AC 22 alap (F)	Jobb	7,12	8,74	8,95	20,4	2,3
	260	AC 22 alap (F)	Bal	8,19	8,09	8,10	1,1	0,1
	300	AC 22 alap (F)	Bal	8,93	7,63	7,70	16,0	0,9
	370	AC 22 alap (F)	Bal	7,80	8,57	7,50	4,0	14,3
	260	AC 22 kötő (F)	Jobb	6,21	6,72	6,40	3,0	5,0
	300	AC 22 kötő (F)	Jobb	6,68	5,65	6,10	9,5	7,4
	370	AC 22 kötő (F)	Jobb	7,25	5,76	5,60	29,5	2,9
	260	AC 22 kötő (F)	Bal	6,48	7,97	6,60	1,8	20,8
	300	AC 22 kötő (F)	Bal	6,68	6,81	6,80	1,8	0,1
	370	AC 22 kötő (F)	Bal	8,39	7,17	7,80	7,6	8,1
	330	AC 11 kopó (F)	Bal	3,66	4,08	4,00	8,5	2,0



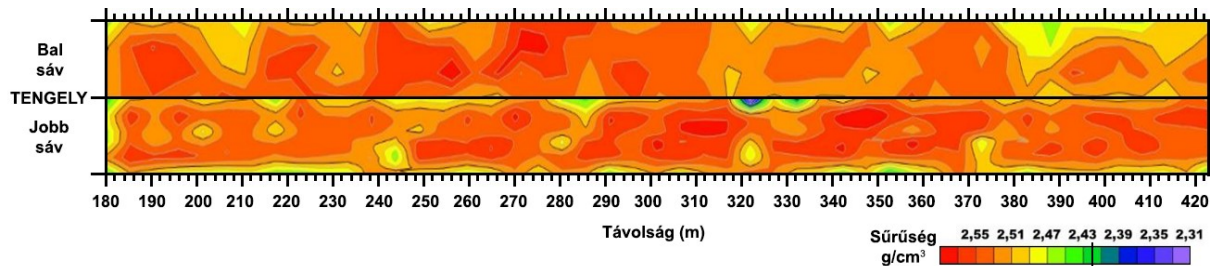
9. ábra. A vizsgálati helyszínen fúrt magminták alapján a dielektromos állandó és a szabadhézag-tartalom között aszfaltrétegenként felállított empirikus modellek (bal), és a számított és megfigyelt AV% értékek viszonya (jobb).

A vastagságmérések után rátérünk a földradarral meghatározott testsűrűség és szabadhézag-tartalom kiértékelésére. A helyszínen mért dielektromos állandó és az aszfaltkeverék szabadhézag-tartalma között a kapcsolatot a (7) összefüggéssel határoztuk meg. A helyszínen mért és a modellel számolt értékeket a 9. ábra mutatja be. Az AC 22 kötő- és alapréteg között nem volt tapasztalható nagy eltérés, mivel a két keverék igen hasonló volt egymáshoz. A modell paramétereit mind a három keveréktípusra a 3. táblázat tartalmazza. Előzetesen meghatároztuk, hogy a két változó, azaz a szabadhézag-tartalom és a dielektromos állandó közötti összefüggést  $R^2 \geq 0,60$  esetén tekintjük csak elfogadhatónak. Szerencsére ez a kritérium mind a három aszfaltrétegnél teljesült. A legmagasabb RMS hibát az AC 11 kopórétegnél találtuk és mivel az  $\epsilon$  hibátag is itt volt a legmagasabb, ezt a modellt végül nem tudtuk használni. Általánosságban kijelenthető, hogy a (7) modell jól tudja előre jelezni a szabadhézag-tartalmat a dielektromos állandóból, mivel a mért és a becsült értékek egy  $45^\circ$ -os egyenesre esnek és a pontok szóródása is kielégítő (9. ábra jobb oldala). Felhasználva mindegyik keverék laboratóriumban meghatározott  $G_{mm}$  értékét, a szabadhézagból a (6) képlettel testsűrűséget számoltunk.

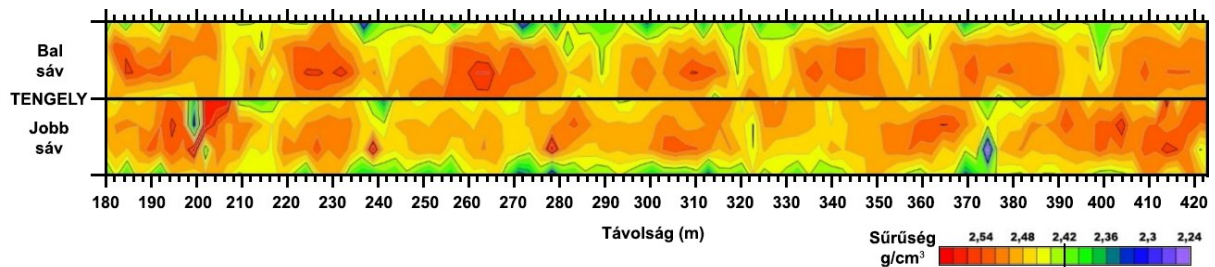
3. táblázat. Az empirikus szabadhézag becsülő modell paramétereit.

Keverék	$\alpha$	$\beta$	$\epsilon$	RMSE	$R^2$
AC 11 kopóréteg	9174,405	-1,325	-4,1985	1,034	0,88
AC 22 kötőréteg	3642,681	-1,292	0,2854	0,880	0,62
AC 22 alapréteg	5546,240	-1,412	0,6506	0,559	0,71

Az AC 22 aszfalt alapréteg sűrűségterképét elemezve megállapítható, hogy a jobb sávban az aszfaltsűrűség a sávközépen a legmagasabb, míg a padka felé haladva az értékek fokozatosan csökkennek. Ezzel szemben a bal sávban az aszfaltsűrűség többé-kevésbé homogén a 0+370 szelvényig, ahonnan kezdve egy jelentősebb sűrűségcsökkenés megfigyelhető az úttengely környezetében. Az AC 22 aszfalt kötőréteg sűrűségterképét elemezve megállapítható, hogy mind a jobb, mind pedig a bal sávban az aszfaltsűrűség a sávközépen a legmagasabb, míg az úttengely felé haladva az értékek fokozatosan csökkennek.



10. ábra. AC 22 alapréteg sűrűségterképe.



11. ábra. AC 22 kötőréteg sűrűségterképe.

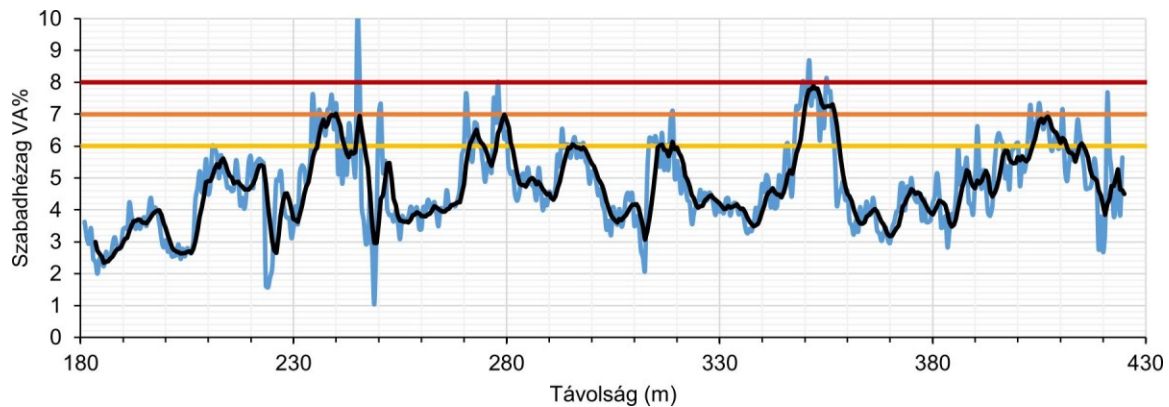
A bemutatott két sűrűségterkép jól szemlélteti azt, hogy a beépített aszfaltanyagok testsűrűsége nem lesz egyenletes a teljes útfelületen, mivel az építési nehézségek rögtön megmutatkoznak minőségcsökkenés képében. Ebből következik, hogy az aszfaltsűrűség a sávközépen a legmagasabb, míg az úttengely felé haladva a sűrűségértékek fokozatosan csökkennek. Az aszfaltalap- és kötőréteg sűrűségterképeit összehasonlítva pedig az is megállapítható, hogy az alaprétegen mért sűrűségértékek magasabbak, tehát az alapréteg jobban lett tömörítve, mint a kötőréteg.

Az AC jelű aszfaltkeverékből épített új kopóréteg előírt átlagos hézagtartalma legfeljebb 6% (a megfelelőségi határ 7%), az új kötő- és az új alapréteg előírt átlagos hézagtartalma legfeljebb 7% (a megfelelőségi határ 8%) lehet az e-ÚT 06.03.21/M1 szerint, ha a mintaszám  $\geq 10$  db. A Texas Department of Transportation (1995) [16] szerint, ha a szabadhézag-tartalom 8,5% és 9,9% közötti, akkor már jelentős értékcsökkenésről beszélünk; míg 9,9% feletti  $V_A$ -nál az útburkolatot el kell távolítani és újra kell építeni [17]. Ennek megfelelően kiszámítottuk minden egyes réteg esetén a  $V_A = 6\% - 7\% - 8\%$  szabadhézag-tartalomhoz tartozó testsűrűség és dielektromos állandó küszöbértékeket. A számítás eredményét a 4. táblázat foglalja össze. A 4. táblázatból jól látszik, hogy az alapréteg és a kötőréteg testsűrűség határértéke három tizedesjegyre kiszámítva is megegyezik, míg az ehhez a testsűrűséghez tartozó dielektromos állandó már mutat kismértékű eltérést. Ez azért lehet mert a sűrűség jóval kisebb tartományban változik, mint a hozzá tartozó dielektromos állandó. Ezért a testsűrűség helyett a dielektromos állandóra vagy a szabadhézagra célszerű határértéket megfogalmazni, amikor a földradar méréseket kiértékeljük.

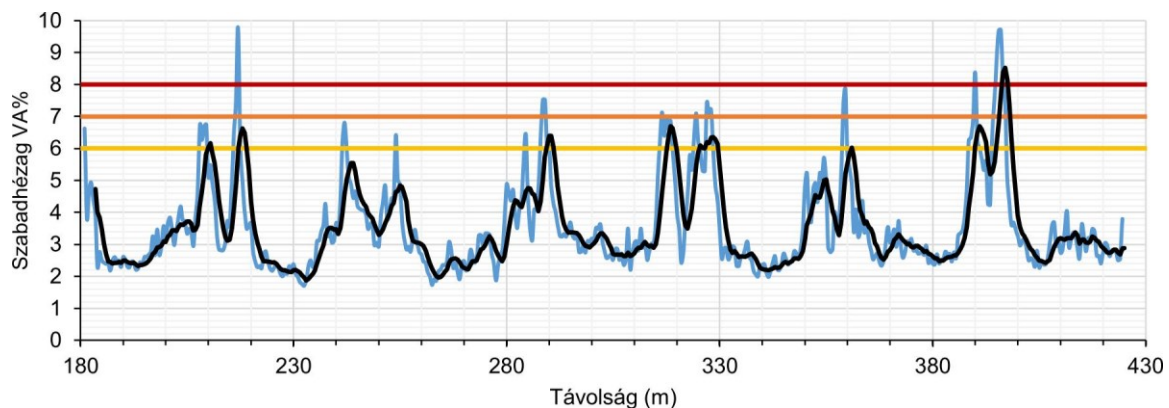
4. táblázat. A szabadhézag alapján megfogalmazott határértékek aszfaltrétegenként.

Keverék	$V_A$ 6%		$V_A$ 7%		$V_A$ 8%	
	$G_{mb}$	$\epsilon_{AC}$	$G_{mb}$	$\epsilon_{AC}$	$G_{mb}$	$\epsilon_{AC}$
AC 11 kopóréteg	2,304	5,13	2,279	5,06	2,255	5,00
AC 22 kötőréteg	2,421	5,00	2,396	4,87	2,370	4,77
AC 22 alapréteg	2,421	4,92	2,396	4,80	2,370	4,69





12. ábra. Az AC 22 kötőréteg szabadhézag-profilja a padkától 0,1 m-re (bal sáv széle), ahol VA 6% a sárga, VA 7% a zöld és VA 8% a piros határgörbe.



13. ábra. Az AC 22 kötőréteg szabadhézag-profilja a padkától 1,7 m-re (bal sáv közepe), ahol VA 6% a sárga, VA 7% a zöld és VA 8% a piros határgörbe.

A könnyebb áttekinthetőség kedvéért bemutatjuk még az AC 22 kötőréteg baloldali sávszélének (a padkától 0,1 m-re) és sávközepének (a padkától 1,7 m-re) a szabadhézag profilját (lásd 12–13. ábra). Berajzolva az ábrákra a 6%–7%–8% hézagtartalomhoz tartozó küszöbértékeket egyből megkapjuk a nem megfelelő vagy bizonytalan minőségű szakaszok szelvényhatárait. Mivel kötőréteg esetén a megfelelőségi határ 8%, ezért a mérésekre illesztett fekete színű mozgóátlag görbe érintési vagy metszéspontját kell megkeresnünk a vízszintes vörös határvonalal. Viszont, ha figyelembe vesszük a modell bizonytalanságát (ami átlagosan 0,6-0,8%-ra tehető), akkor helyesebb, ha a narancssárga (előírt) és a vörös (megfelelőségi) határvonalak közötti tartományt tekintjük nem megfelelőnek. Ezt elfogadva megállapíthatjuk, hogy a burkolat szélén a 0+370 és 0+380 szelvények közötti 10 méter hosszú útszakasz tömörsége nem megfelelő, de a 0+235 és 0+250 szelvényhatárok közötti 15 m-es útszakaszt is érdemes még tovább vizsgálni. A sávközépnek viszont csak a 0+395 és 0+400 szelvények közötti útszakasza esik a nem elfogadható szabadhézag tartományba.

A vizsgált kísérletű útszakaszon mind a 12 db fűrt magminta szabadhézag-tartalma jellemzően 2-5% között változott, így gyengébb minőségű építési szakaszokat nem jeleztek előre. Ebből is látható, hogy a földradar technológia legnagyobb előnye az, hogy igen nagy az adatsűrűség, valamint gyorsan és relatív pontosan képes dielektromos vagy testsűrűség vagy szabadhézag térképeket és profilokat előállítani. Ezek a térképek pedig ideálisak arra, hogy a gyengébben vagy éppen a jobban tömörített útszakaszokat lehatároljuk és azok minőségét fűrt mintával igazoljuk.

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben bemutatott mérések és azok feldolgozása alapján javasoljuk, hogy újépítésű pályaszerkezeti rétegek vastagságmérésénél minden réteg közé be kell építeni alumínium fólia antipólusokat, mivel ezek nagymértékben megnövelik a földradar adatok kiértékelésének pontosságát.

Hasonlóan az örvényáramos vastagságmérés technikához, ahol a réteg terítése előtt a fogadófelületre szintén egy antipólust helyeznek le, ami sok esetben szintén egy egyszerű alumíniumlap [18].

A vizsgált délalföldi lakóutca 220–240 m hosszú kísérleti útszakaszának tapasztalatai azt mutatják, hogy célszerű minden réteg terítése és betömörítése után az aktuális réteg felszínén elvégezni a földradar méréseket. A mért adatokból pedig csak az éppen vizsgált réteg vastagságát felhasználni a minőségellenőrzéshez. Ez az eljárás ugyan több mérést igényel, de sokkal pontosabb lehet, mint az egyszeri, a kész pályaszerkezet felszínén történő vastagságmérés. A többletmérés másrészt lehetővé teszi, hogy minden réteg testsűrűség vagy szabadhézag tartalmát is megállapítsuk.

Az aszfaltkeverékek dielektromos állandója és azok szabadhézag-tartalma között erős kapcsolatot találtunk, hasonlóan a nemzetközi szakirodalomhoz. Szisztematikus adatgyűjtéssel olyan empirikus modell fejleszthető, amivel a  $V_a$  értékeket  $\pm 1\%$  pontosan meg lehet becsülni. Erre a célra legjobban a fúrások helyén megmért dielektromos állandók és a fűrt minták laboratóriumban meghatározott hézagjellemzői használhatóak fel. Valójában erre nincs is mindig szükség, hiszen határértéket közvetlenül a dielektromos állandóra is megfogalmazhatunk. Újra felhívjuk a figyelmet arra a tényre, hogy a különböző utakról gyűjtött GPR adatok már bizonyították, hogy a dielektromos állandó értékének csökkenése mindig sűrűségproblémákat jelez előre! Ezért az első hengerjárat után mért dielektromos állandó térképek már jó viszonyítási alapot adnak a későbbi kiértékelésekhez.

Összefoglalva kijelenthetjük, hogy a roncsolásmentes útdiagnosztikai módszerek közül a földradarok és az intelligens úthengerek (Intelligent Compaction, IC) képesek egyedül biztosítani az aszfaltkeverék folyamatos kvantitatív tömörségének meghatározását. Viszont továbbra is csak a földradar módszer alkalmas a tömörség mellett az útpályaszerkezet rétegvastagságnak a meghatározására is, így az építési minőség ellenőrzésére jó szívvel ajánlható.

## 6. IRODALOMJEGYZÉK

[1]: Goel, A. & Das, A. 2008: Nondestructive Testing of Asphalt Pavements for Structural Condition Evaluation: A State of the Art. *Nondestructive Testing and Evaluation* 23 (2): 121–40. <https://doi.org/10/fdtqhf>.

[2]: Tóth, C. & Primusz, P. 2021: Modern roncsolásmentes útdiagnosztikai eszközök. *Az Aszfalt* 28 (1): 33–47.

[3]: Pattantyús-Á., M., Neduczka, B., Prónay, Z. & Törös, E. 1994: A földradar módszerfejlesztés másfél éves tapasztalatai az ELGI-ben. *Magyar geofizika* 35 (1): 32–41.

[4]: Katona, O., Sipos, G., Fiala, K., Rakonczai, J. & Mezösi, G. 2013: A georadar működése és felhasználási területei. *Hidrológiai közlöny* 93. évf. (4. sz.): 55–60.

[5]: Kóti, Á. 2014: Közforgalmú utak úthibáinak roncsolásmentes vizsgálata földradar segítségével. Diplomamunka, Miskolc: Miskolci Egyetem.

[6]: Maser, K. R. & Scullion, T. 1992: Automated Pavement Subsurface Profiling Using Radar: Case Studies of Four Experimental Field Sites. *Transportation Research Record* 1344: 148–54.

[7]: Krysiński, L. & Sudyka, J. 2013: GPR Abilities in Investigation of the Pavement Transversal Cracks. *Journal of Applied Geophysics* 97 (október): 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.03.010>.

[8]: Diamanti, N. & Redman, D. 2012: Field Observations and Numerical Models of GPR Response from Vertical Pavement Cracks. *Journal of Applied Geophysics* 81 (június): 106–16. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.09.006>.

[9]: Sudyka, J. & Krysi, L. 2011: Radar Technique Application in Structural Analysis and Identification of Interlayer Bonding. *International Journal of Pavement Research & Technology* 4 (3): 10.

[10]: Lambot, S., Weihermüller, L., Huisman, J. A., Vereecken, H., Vanclooster, M. & Slob, E. C. 2006: Analysis of Air-Launched Ground-Penetrating Radar Techniques to Measure the Soil Surface Water Content. *Water Resources Research* 42 (11). <https://doi.org/10/b7rkw2>.

- [11]: Petőcz, M., Schváb, J. & Szarka, I. 1999: Útpályaszerkezeti rétegek roncsolásmentes vastagságmérése. Közúti és mélyépítési szemle 49 (6): 219–25.
- [12]: Runa, B. & Balogh, P. 2021: Georadar szerepe a roncsolásmentes útpályadiagnosztikában. Az Aszfalt XXVIII. (2): 49–56.
- [13]: Saarenketo, T. 1997: Using Ground-Penetrating Radar and Dielectric Probe Measurements in Pavement Density Quality Control. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1575 (1): 34–41. <https://doi.org/10/d28cch>.
- [14]: Saarenketo, T. & Scullion, T. 2000: Road Evaluation with Ground Penetrating Radar. Journal of Applied Geophysics 43 (2–4): 119–38. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00052-X](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00052-X).
- [15]: Hoegh, K., Roberts, R., Dai, S. & Zegeye Teshale, E. 2019: Toward Core-Free Pavement Compaction Evaluation: An Innovative Method Relating Asphalt Permittivity to Density. Geosciences 9 (7): 280. <https://doi.org/10/ghgqbc>.
- [16]: TxDOT 2004: Standard Specifications for Construction and Maintenance of Highways, Streets, and Bridges. Texas Department of Transportation.
- [17]: Chen, D.-H., Hong, F., Zhou, W. & Ying, P. 2014: Estimating the Hotmix Asphalt Air Voids from Ground Penetrating Radar. NDT & E International 68 (december): 120–27. <https://doi.org/10/f6p8h5>.
- [18]: Pethő, L. & Tóth, C. 2010: Beépített aszfaltrétegek vastagságának roncsolásmentes meghatározása. Közlekedésépítési szemle 60 (8): 15–19.