



# Virtuális inerciapont módszeren alapuló útpályaszerkezet diagnosztikai eljárás validálása

## Primusz Péter, Tóth Csaba

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Út és Vasútépítési Tanszék

E-mail: [toth.csaba@emk.bme.hu](mailto:toth.csaba@emk.bme.hu), [peter.primusz@emk.bme.hu](mailto:peter.primusz@emk.bme.hu)

DOI: [10.36246/UL.2023.2.05](https://doi.org/10.36246/UL.2023.2.05)

### KIVONAT

Korábbi kutatások felvetették az elvi lehetőségét, hogy az FWD mérési eredményekből akár az útpályaszerkezet rétegvastagságok is meghatározhatók, ezen gondolatot továbbfejlesztve kidolgoztunk egy olyan algoritmust, amely alkalmazásával a rétegvastagság elvárt pontosságú becslése megvalósítható. A módszer a behajlási teknő egy kitüntetett pontján az ún. inerciaponton alapul. A kapott eredményeket egy magyarországi tesztszakaszon fúrt mintavételekkel, illetve földradar mérésekkel validáltuk.

Túl azon, hogy az inerciapont módszerrel a földmű teherbírasi modulus meghatározására egy újabb eljárás is előállt, a módszer továbbfejlesztése olyan irányban tűnik nagy jelentőségűnek, hogy az eljárást a folytonosan mérő behajlásmérő készülékre (Curviameter, Rolling Wheel Deflectometer) adaptálva a behajlásméréssel egyidejűleg a jövőben a rétegvastagság is becsülhetővé váljék.

*Kulcsszavak:* FWD, GPR, behajlási teknő, vastagságbecslés, virtuális inerciapont, teherbírasi modulus, helyszíni validálás

### ABSTRACT

Previous research has raised the theoretical possibility that FWD measurement results can be applied to determine the layer thickness of the road surface structure, and we have developed an algorithm to estimate the layer thickness with the expected accuracy. The method is based on the so-called point of inertia at a marked point of the surface deflection basin. The results obtained were validated by drilling core samples and by ground penetrating radar measurements on a test section in Hungary.

In addition to the fact that the inertia point method is a new method for the determination of the bearing capacity of subgrade, the further development of the method seems to be of great importance in order to be able to estimate the layer thickness in the future by adapting the method to the continuous measuring deflection measuring device (Curviameter, Rolling Wheel Deflectometer).

*Keywords:* FWD, GPR, surface deflection basin, thickness estimation, virtual inertia point, bearing modulus, on site validation

### Primusz Péter

*A Soproni Egyetem (SOE) Erdőmérnöki Karán a Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet munkatársa. Fő kutatási területe az útfenntartás és az útpályaszerkezetek méretezése, megerősítése. PhD hallgató a BME Út és Vasútépítési Tanszéken.*

### Tóth Csaba

*A Magyar Mérnöki Kamara, a Közlekedéstudományi Egyesület, a Magyar Útügyi Társaság tagja, jelenleg az BME Út és Vasútépítési Tanszék docense. Korábban a Csongrád Megyei Állami Közútkezelő 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. Publikációinak száma: több mint 100*

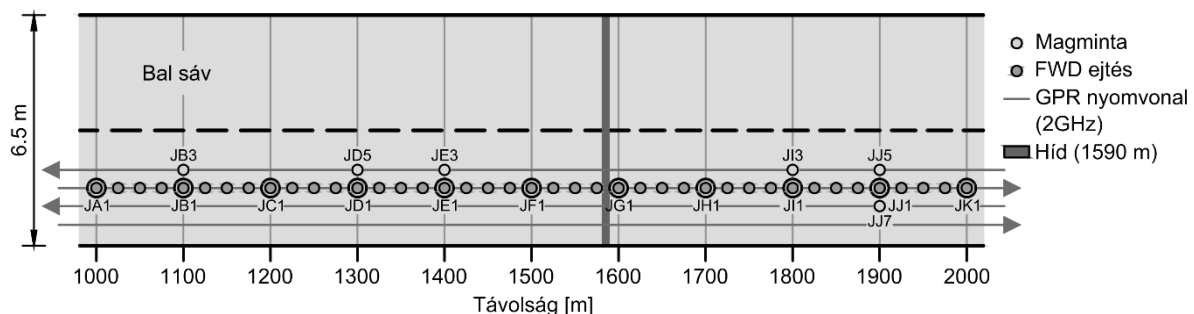
## 1. BEVEZETŐ

Az útpályaszerkezetek állapotának felmérésére a gyakorlatban két fő vizsgálati módszert különböztetünk meg: a roncsolásost és a roncsolásmentest.

A „Virtuális inerciapont módszeren alapuló útpályaszerkezet diagnosztikai eljárás elméleti alapjainak kidolgozása” című cikkünkben olyan számítási eljárást ismertettünk, amely a roncsolásmentes FWD berendezéssel rögzített behajlásadatokból kiindulva képes a rétegvastagságokat visszaszámítani.

Az elvi módszer és az alapján kidolgozott algoritmus validálása érdekében az eredményeinket egyrészt az AASHTO (1993) [1] útmutató függelékében szereplő eljárás eredményeivel is összevetettük, illetve másrészt az FWD behajlásmérés adataiból kiindulva, a rétegvastagságok ismeretében a BAKFAA programmal meghatározott a rétegmodulusokkal is összehasonlítottuk.

A kidolgozott értékelési eljárást Magyarországon, Budapesttől kb. 85 km-re, Gyöngyös városát nyugatról elkerülő közúti kísérleti útszakaszon teszteltük. A kijelölt kísérleti szakaszon két roncsolásmentes mérési módszerrel, az FWD és a GPR berendezésekkel vizsgáltuk az útállapotjellemzőket, a mérések térbeli elrendezését az 1. ábra szemlélteti. A kísérleti útszakasz burkolatállapotát első lépésként szubjektív állapotértékeléssel és videófelvétel készítésével rögzítettük.

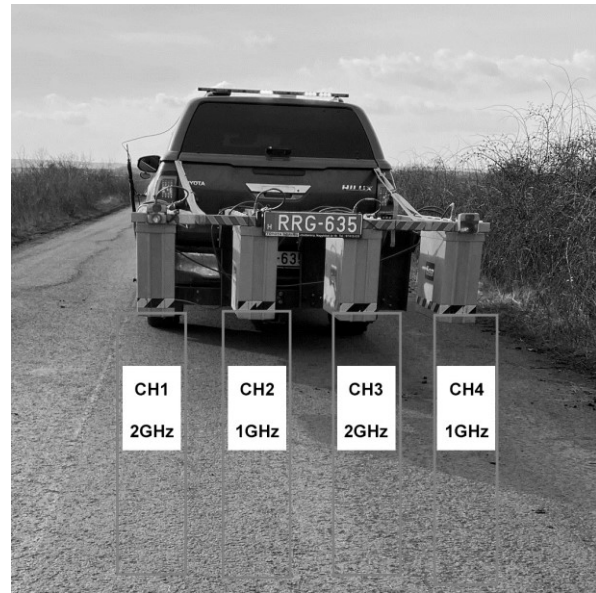


1. ábra: A kísérleti útszakasz méréseinek térbeli elrendezése.

Meghatároztuk a reflexiós repedések, az úthibák és a műtárgyak helyeit (1. ábra). Ennek célja az volt, hogy az úthibákat figyelembe tudjuk venni a radarszelvények kiértékelésekor.



2. ábra: Az úthibák szemrevételezéssel történő rögzítése.



3. ábra: A projekt során használt GPR berendezés (forrás: RODEN Mérnöki Iroda).

A méréshez használt KUAB típusú FWD berendezés terhelő tárcsájának sugara 150 mm volt, és az érzékelők (7 db) a terhelés tengelyétől  $r_0 = 0$ ,  $r_1 = 200$ ,  $r_2 = 300$ ,  $r_3 = 450$ ,  $r_4 = 600$ ,  $r_5 = 900$  és  $r_6 = 1200$  mm távolságokban helyezkedtek el. A KUAB berendezés az 50 kN nagyságú terhelő erő hatására ébredő  $D_0$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ,  $D_4$ ,  $D_5$  és  $D_6$  behajlásokat a szenzor pozíciókban rögzítette. A vizsgált útszakasz sávközepén 25 méterenként két ejtést hajtottunk végre, egy előterhelés után következett maga a mérés. Minden mérési pontban regisztráltuk a behajlásadatok mellett a terhelő erő nagyságát, a léghőmérséklet és a burkolathőmérséklet adatokat. Az FWD berendezéssel rögzített behajlásokat a mérés után 50 kN-os terhelésre korrigáltuk.

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. 250 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 2 GHz-es antennák RADAN szoftverrel feldolgozott eredményeit értékeljük.

Összehasonlításként a vizsgált útszakasz rétegrendjét 100 méterenként roncsolásos módszerekkel is feltártuk (4. ábra).



a) fúrt mintavétel



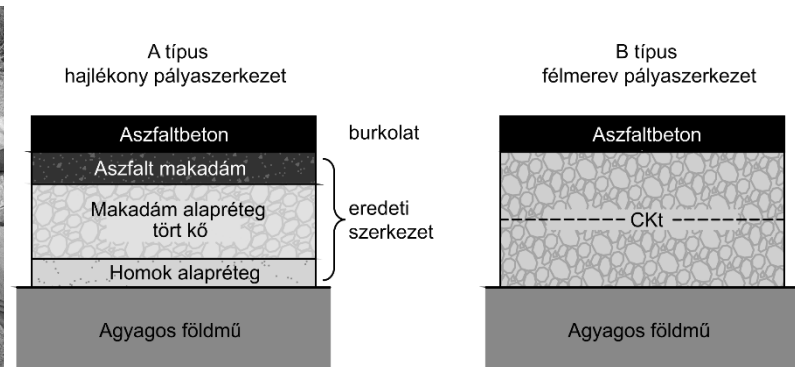
b) aszfalt és Ckt rétegekből származó fúrt minták



c) makadám alaprég átörése



d) földmő mintavétel



e) a rekonstruált pályaszerkezet-típusok sematikus ábrája

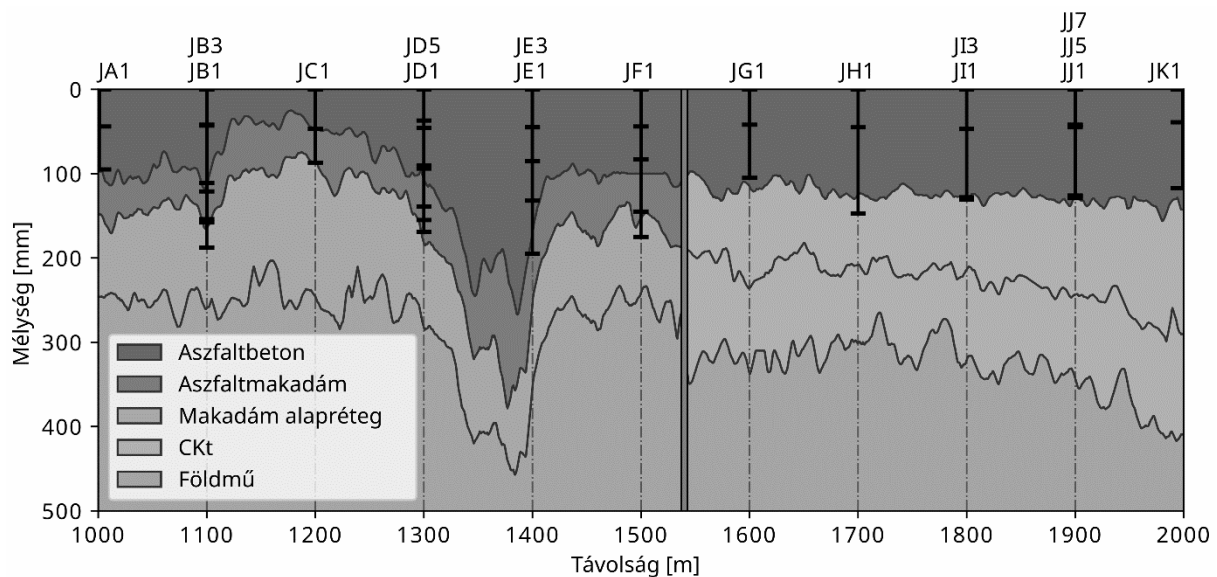
4. ábra: A pályaszerkezet és földmő helyszíni feltárása.

A magmintavételi technológiát jól tudtuk használni az aszfaltrétegek és a hidraulikusan kötött alaprétegek pontos vastagságának meghatározására. A szemcsés, durva zúzottkő útalapot viszont már csak kézi erővel sikerült átörni és lemérni. A földmőanyagából folyamatos spirálfúrással vettünk mintát a kialakított furatokon keresztül.

A kísérleti útszakaszon két fő pályaszerkezet-típust lehetett rekonstruálni a mérésekből. Az első hajlékony (A típusú) útpályaszerkezet eredetileg aszfaltmakadám burkolatú volt. A szerkezet kötött (agyagos) földmőre épült, ezért a zúzottkő útalapot homokrétegre fektették, ami egyben a különböző idomkő vastagságokat is kiegyenlítette. A teherbíró alpra végül 5–7 cm vastagságú bitumennel bepermetezett újabb zúzottkőréteg került. Idővel pedig ahogyan a szerkezet a forgalom hatására leromlott, egy új aszfaltbeton erősítőréteggel is ellátták azt. A második félmerev (B típusú) szerkezet cement kötőanyaggal kezelt szemcsés útalpra épült. Erre az alaprétgre – ami esetenként két rétegből állt – fektették a további aszfaltrétegeket.

## 2. EREDMÉNYEK ÉS MEGVITATÁSUK

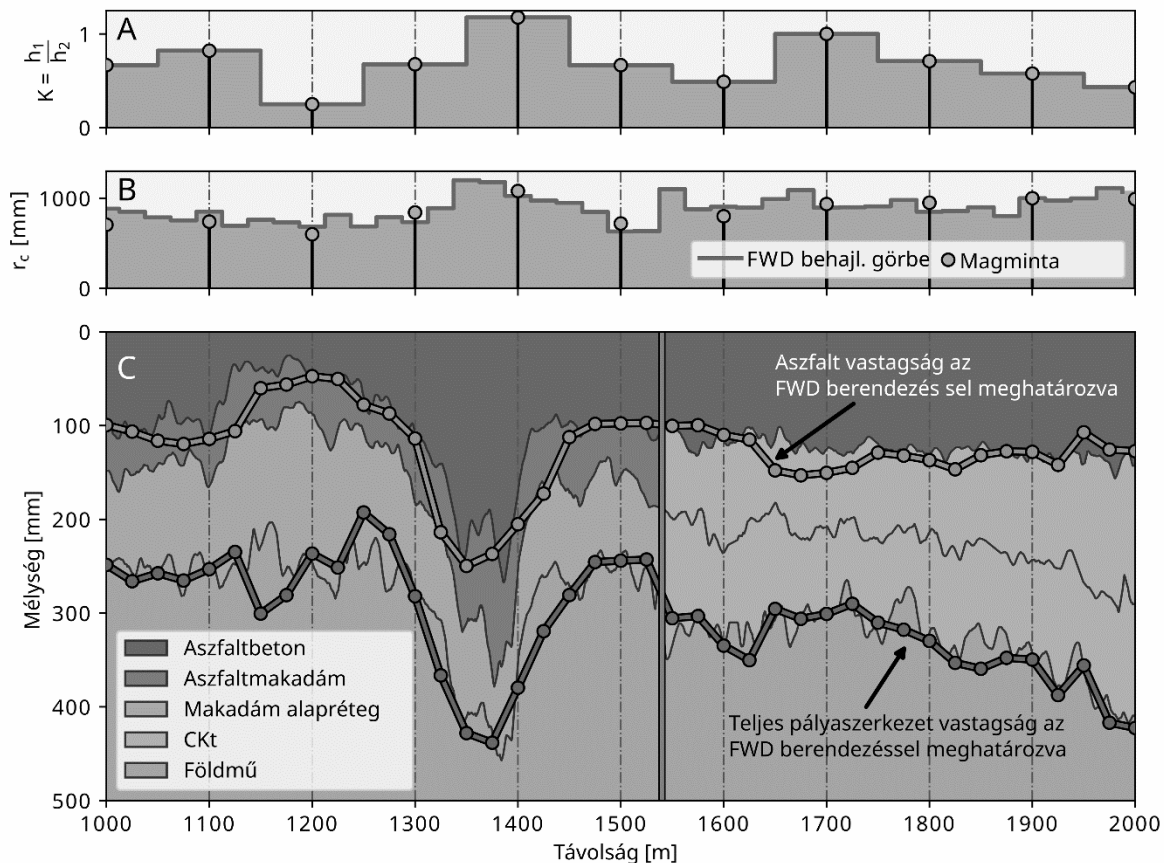
A roncsolásmentes mérési módszerek közül, a földradaros eredmények feldolgozása kimutatta, hogy a bal és a jobb forgalmisáv szerkezeti felépítése jelentősen eltérő. Ennek valószínű oka az, hogy az útszakaszt az évtizedek alatt többször is korszerűsítették, a forgalmi sávokat eltérő technológiákkal szélesítették, a magassági vonalvezetést korrigálták, a pályaszerkezetet pedig megerősítették. A radarszelvény alapján a jobb forgalmi sáv két szakaszra különült el (5. ábra).



5. ábra: Az aszfalt és az alaprétegek vastagságának GPR-értékelése és a magmintavételek adatai.

A fúrások alapján az első szakasz 1000 és 1542 méter között zúzottkő (makadám), a második szakasz 1542 és 2000 méter között pedig hidraulikus (CKt) útalapra épült. A pályaszerkeztváltás pontos szelvényét a földradaradatokból lehet megállapítani, míg a szerkezetek anyagát a fúrásokkal derítettük fel.

A földradar rétegvastagságok és a magmintavétellel nyert aszfaltvastagságok hossz-szelvényét a 4. ábra szemlélteti. Valamennyi radarszelvényen jól kirajzolódtak az aszfaltréteghatárok, de az alsóbb rétegek határait a makadám útalapú szakaszon sok esetben nem tudtuk egyértelműen meghatározni. Az aszfalt kopó és alaprétegek hasonló relatív dielektromos állandójából következően a két réteg közötti határfelületet sem mindig lehetett egyértelműen megkülönböztetni, így csak az aszfaltrétegek teljes vastagságát használtuk a későbbi elemzésekre fel. A földradarral becsült aszfaltvastagságok átlagos eltérése a fúrómagokhoz képest az első szakaszon 5,59%, míg a másodikon csak 1,63% volt. Az első szakasz nagyobb pontatlanságát az okozza, hogy az aszfaltrétegek alatt egy változó vastagságú aszfaltmakadám réteg fekszik, amelynek elkülönítése jelenleg nem egyértelmű csupán földradar mérésekre támaszkodva. A radarszelvények azt is kimutatták, hogy a hidraulikus (CKt) útalap két rétegben épült. Ezt a magmintavétel is megerősítette, sok esetben a minta a réteghatáron elnyíródott, helyenként beszakadt. Ezért több esetben csak a felső rétegvastagságot lehet összehasonlítani a földradar mérések eredményeivel. A CKt rétegvastagságok átlagosan 4,34%-ban tértek el a fúrómagokon azonosítottaktól.



6. ábra: Teljes és aszfaltburkolati rétegvastagság FWD-adatok alapján.

A pályaszerkezetfeltárások alapján meghatároztuk a  $K$  rétegvastagság arányszámokat, amiket a köztes szelvényekre lépcsőfüggvénnyel kiterjesztettünk (5-A. ábra). *(Jelen cikkben a számítási algoritmust, így a  $K$  rétegvastagság arányszám értelmezését nem ismertetjük, mert az Útügyi lapokban „Virtuális inerciapont módszeren alapuló útpályaszerkezet diagnosztikai eljárás elméleti alapjainak kidolgozása” címmel megjelent cikkünkéből rekonstruálható).* Az FWD berendezéssel mért behajlásokból minden ejtés helyére becsültünk egy  $r_c$  értéket (5-B. ábra). A behajlási teknőből levezett  $r_c$  radiális távolságokat a fúrásokból származó vastagságadatokkal kalibráltuk. A végleges  $r_c$  távolságokhoz kiszámítottuk az

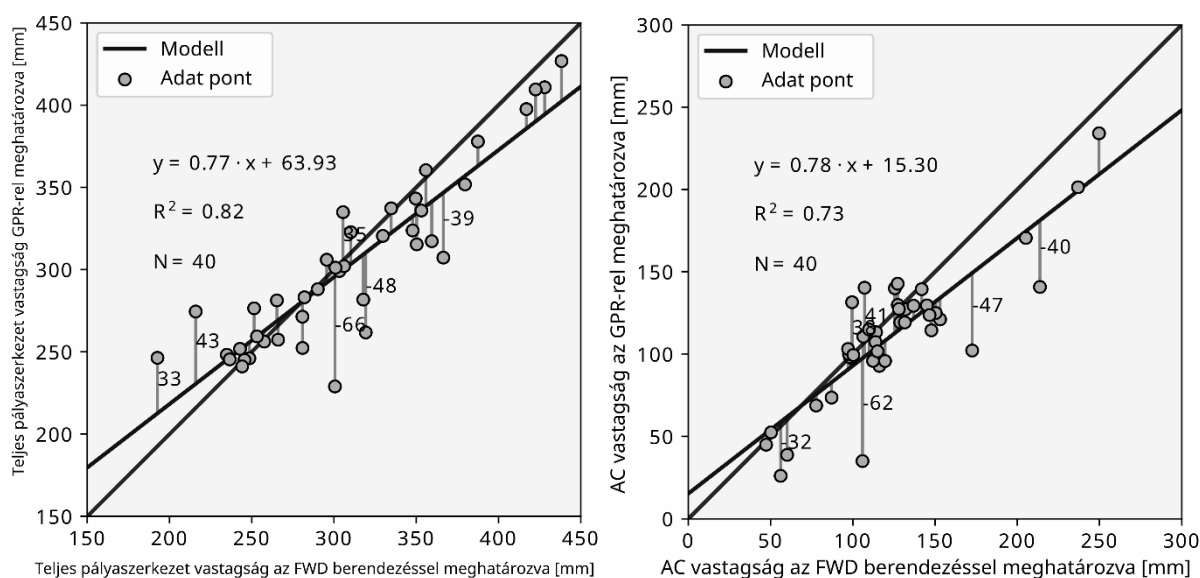
$$D(r) = \frac{D_0 4a^2}{(ar)^\beta + 4a^2} \quad (1)$$

függvénnyel a  $D_c$  behajlásokat. Az  $r_c$  és  $D_c$  adatpárokat behelyettesítve

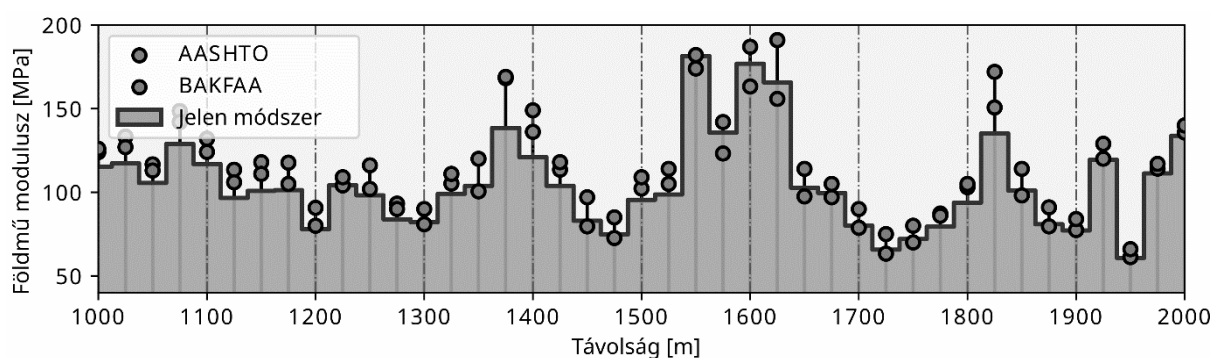
$$E_c = C \frac{(1 - \mu^2)qa^2}{r_x D_x} \text{ ha } r > 0,25a \quad (2)$$

egyenletbe, megkaptuk a földmű  $E_{sg}$  teherbírasi modulusát. Ezek után már minden olyan adat rendelkezésre áll, ami szükséges a Gauss-folyamat regressziós modellhez. Behelyettesítve a szükséges adatokat a  $GP(r_c, D_c, K, E_{sg})$  modellbe, becslést tettünk a teljes  $H$  pályaszerkezetvastagságra. Végül felhasználva a  $K$  rétegvastagság arányszámot a teljes  $H$  pályaszerkezetvastagságot felbontjuk  $h_1$  aszfalt és  $h_2$  alaprég vastagságokra (5-C. ábra). Megfigyelhetjük a 5-C. ábrán, hogy a földradarral mért rétegvastagságokat jól megközelíti az FWD behajlásokból számoltak. A földradarral (GPR) és az ejtősúlyos behajlásmérő berendezéssel meghatározott rétegvastagságok egymással történő összehasonlítását az 6. ábra szemlélteti. Azért a választottuk GPR adatokat az behajlásból számolt

vastagságadatok ellenőrzésére, mivel sokkal több mérési pontot tudunk vizsgálni, mintha csak a fúrásokra támaszkodnánk. Meg kell jegyezni viszont, hogy a földradarral meghatározott teljes pályaszerkezet vastagságát sem tekinthetjük tökéletesen pontos adatnak, mivel a zúzottkő útalapot a földmű anyagától nehéz volt esetenként elkülöníteni. Ezért az, hogy az FWD mérésből becsült és a földradarral mért teljes pályaszerkezet vastagságok közel esnek az 1:1 arányú egyeneshez, már önmagában nagy eredménynek lehet tekinteni. A teljes aszfaltvastagságok már nagyobb mértékben térnek el az ideális körülményektől, aminek egyik oka, hogy a teljes aszfaltvastagságot a  $K$  rétegaránnyal a teljes pályaszerkezet vastagságából becsültük meg. A  $K$  rétegarány felvétele a fúrásokból és annak térbeli kiterjesztése további hibákkal terhelte a modell eredményét. Átlagosan  $\pm 45$  mm eltérés mutatható ki a két mérési módszer között, ami a gyakorlati számítások szempontjából már elfogadhatónak tekinthető.



7. ábra: A vastagságbecslés ellenőrzése GPR-adatok felhasználásával.



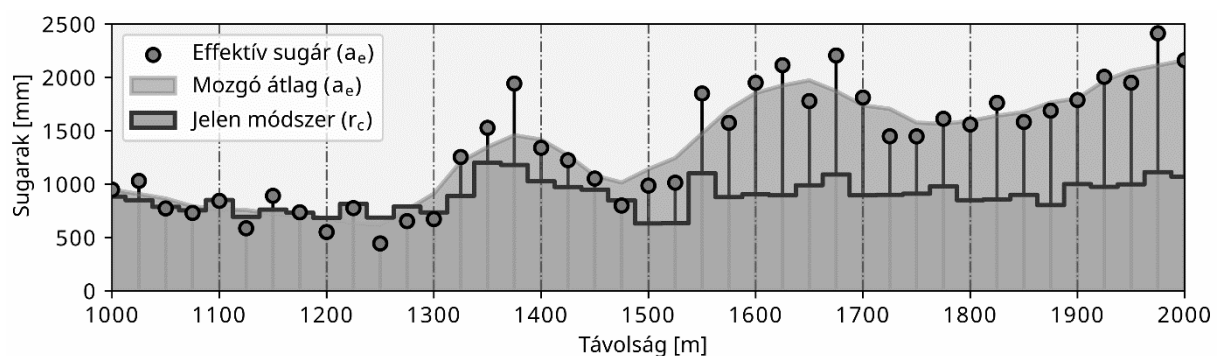
8. ábra: A módszer eredményeinek összehasonlítása az AASHTO és a BAKFAA eljárások alapján kapott értékekkel.

Az inerciapont alapján számolt  $E_{sg}$  földmű teherbírasi modulusokat összevetettük az AASHTO (1993) [1] eljárás és a BAKFAA program eredményeivel. Grafikusan ábrázolva az adatokat megállapítható, hogy az inercia ponton alapuló földműteherbírás jól közelíti a másik két módszer eredményeit. A kidolgozott módszerünk jellemzően 5-10 MPa-lal kisebb modulusértékeket becsült, mint a másik két eljárás.

A fúrások alapján 1000 és 1542 méter között a lehatárolt első hajlékony útszakasz (makadám útalap) földművének átlagos teherbírása 100 MPa. Ezután a második hidraulikus útalapú szakaszon az 1542 és 1625 szelvények között található egy rövid, de átlagosan 165 MPa-os földműteherbírású szakasz. Ez a

kiugró földműteherbírás azzal magyarázható, hogy az 1590 és 1600 méter között hídszerkezet van. A közúti hídhoz a kísérleti útszakasz ezen része magas töltéssel csatlakozik, ami így a kedvezőtlen vízmozgásoktól jobban védett. A második szakasz maradék részének átlagos földműteherbírása visszaesik átlagosan 95 MPa-ra. A viszonylag magas földműteherbírások az igen kemény agyag altalajjal magyarázhatók.

A földműteherbírás eredmények azt mutatják, hogy Boussinesq homogén végtelen féltérre kidolgozott (1) egyenlete nem érzékeny  $r_x$  pontos értékére. Ezt még szemléletesebben be lehet mutatni, ha összehasonlítjuk az inercia pontok  $r_c$  távolságát az AASHTO (1993) [1] eljárás által használt  $a_e$  effektív sugárértékekkel. Az adatokat hossz-szelvényen ábrázolva megállapítható, hogy a hajlékony zúzottkő útalapú szakaszon az  $r_c$  távolságok nagyjából megfeleltethetők az effektív sugaraknak (8. ábra). Vagyis az a feltevés, hogy  $r_c$  megközelítőleg azonos az effektív  $a_e$  sugárral, hajlékony szerkezeteknél fenn áll. A félmerev, hidraulikus útalapú második szakaszon viszont már markánsan eltér a két érték egymástól.



9. ábra: A radiális távolság ( $r_c$ ) és az effektív sugár ( $a_e$ ) értékek alakulása a kísérleti szakaszon.

Ez azért van, mert  $a_e$  értékét a földmű feletti útpályaszerkezet  $E_{op}$  teherbírási modulusa is befolyásolja, annak hatása sokkal jobban jelentkezik a nagy teherbírású második szakaszon. Az inercia pont viszont nem függ a felső útpályaszerkezet  $E_{op}$  teherbírási modulusától, így értéke viszonylag állandó marad a félmerev szerkezeteknél is.

Az inerciapont  $r_c$  sugara  $4,5a$  és  $7,5a$  között változott, átlagosan  $6a$  távolságra helyezkedett el a terhelés tengelyétől. Ez azt jelenti, hogy a földmű teherbírását elég jól jellemzi a tárcsaközéptől  $6 \cdot 150 \text{ mm}$ -re, azaz  $900 \text{ mm}$ -re lévő szenzor behajlásértéke. Ennél is érdekesebb, hogy az 1000 méteres kísérleti útszakaszon a terhelő tárcsáról kiinduló feszültségkúp hajlásszöge csak  $20^\circ \pm 2^\circ$ -ra adódott, szemben az irodalomban gyakran idézett  $34^\circ$ -kal [2].

Annak ellenére, hogy jelen kutatómunka még kezdeti stádiumban van, a bemutatott eredmények biztatónak mondhatóak. Az inercia pont alapján nem csak a földmű teherbírását, hanem a teljes pályaszerkezet vastagságát is meg lehet becsülni elég pontosan. A módszer robusztusságát még őszi, téli, tavaszi és nyári körülmények között végrehajtott FWD mérésekkel is igazolni kell, mielőtt azt a gyakorlat számára javasolni lehetne. Ez a jövőbeni kutatások egyik lehetséges iránya.

### 3. ÖSSZEFOGLALÁS

Korábbi kutatásaink során kidolgoztuk egy olyan elvi eljárás alapjait, amely roncsolásmentes FWD berendezéssel rögzített behajlásadatokból kiindulva képes a rétegvastagságokat visszaszámítani. A kidolgozott módszer az inerciapont elvén alapul és segítségével minden ejtési pontban a teljes aszfaltvastagság is meghatározható, illetve a vastagságokon túl az inerciapont felhasználásával a földmű teherbírási modulusát is nagy pontossággal lehetséges visszaszámolni. Jelen cikkben ezen algoritmus által szolgáltatott adatok megbízhatóságát vizsgáltuk egy helyszíni vizsgálat sorozat keretében.



A kísérleti útszakasz adatai alapján az inerciapont  $r_c$  sugárértéke nem érzékeny a pályaszerkezet alkotó rétegek merevségére, az csak a teljes pályaszerkezet vastagságtól és a földmű teherbírásától függ. A kidolgozott számításunkat összehasonlítottuk az AASHTO (1993) [1] eljárással és a földmű teherbírásra igen hasonló értékeket kaptunk. Az AASHTO (1993) [1] eljárás effektív sugárértéke ( $a_e$ ) hajlékony útpályaszerkezetnél közel esik  $r_c$  sugárértékhez, de félmerev szerkezeteknél már erősen eltér attól. A cikkben bemutatott módszer a rétegvastagságok visszaszámításán túl alkalmas lehet még a földműteherbírás szezonális változásának nyomon követésére is. További kutatást igényel az inercia pont  $r_c$  sugárértékének egzaktabb és pontosabb meghatározása, ez kulcskérdés a módszer használhatósága szempontjából. Ennek megoldása lehetővé tenné a jövőben azt, hogy a rétegvastagságokat a folytonosan mérő behajlasmérő készülékek, mint pl. a Curviameter vagy a Rolling Wheel Deflectometer is megtudják határozni. A kétféle roncsolásmentes mérési módszer eredményeinek összevetésével a bizonytalanságok az adatok értelmezésében feloldhatóak, és jobb, pontosabb útdiagnosztikát tesznek lehetővé.

#### 4. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatásban alkalmazott GPR rendszert a RODEN Mérnöki Iroda Kft. biztosította a 2018-1.1.2-KFI-2018-00029 projekt keretében, amelyet az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal - Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap támogatott.

#### 5. IRODALOM

[1]: Officials, Transportation. 1993. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. Köt. 1. AASHTO.

[2]: Rohde, G. T. 1994: Determining Pavement Structural Number from Fwd Testing. In Strength and Deformation Characteristics of Pavement Sections, 61–68. *Transportation Research Record* 1448. Transportation Research Board.