

# ERDÉSZETI UTAK TEHERBÍRÁSÁNAK MÉRÉSE A TOVÁBBFEJLESZTETT KÉZI BEHAJLÁSMÉRŐVEL

**Markó Gergely, Primusz Péter és Péterfalvi József**

*Nyugat-magyarországi Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Geomatikai,  
Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási intézet*

## Kivonat

Az aszfaltburkolatú utak az erdőgazdaságok nagy állóeszközértéket képviselő létesítményei, amelyek megfelelő műszaki állapotának fenntartása jelentős költségekkel jár. A rendszerváltozást követően az erdőgazdálkodók jellemzően nem rendeltek megfelelő forrásokat feltáráshálózatok fenntartására. Az erdőszeti szállításban mértékadónak tekinthető tehergépjárműállomány az elmúlt évtizedekben nagy tengelyterhelésű járművekre cserélődött, ez a folyamat a szállítópályák leromlását felgyorsította. Mindezek miatt az erdőfeltárási témakörben a hangsúly a feltáráshálózatok bővítéséről áthelyeződött a meglévő utak fenntartására és fejlesztésére. Az Erdőfeltárási Tanszéken folyó kutatások – az erdőgazdaságok által megrendelt kutatási-fejlesztési megbízásokkal párhuzamosan – követik ezt a trendet. A cikk az aszfalt kopóréteggel rendelkező pályaszerkezetek teherbírásának roncsolásmentes meghatározása területén elért legújabb eredményeinket mutatja be. A Benkelman-gerenda továbbfejlesztésével elkészült egy teherbírás mérő eszköz prototípusa, amely a központi behajlás mellett a behajlási teknő alakját is rögzíti. A kifejlesztett mérőeszköz és szoftvercsomag, valamint az új mérési eljárás gyakorlati alkalmazhatóságát a szerzők egy másodosztályú erdőszeti feltárási úton végzett méréssorozaton keresztül mutatják be.

*Kulcsszavak:* Benkelman-gerenda, behajlásmérés, erdőszeti utak, teherbírás, útfenntartási rendszer

## MEASURING BEARING CAPACITY OF FOREST ROADS WITH THE ADVANCED BENKELMAN BEAM APPARATUS

### Abstract

Forest roads covered with asphalt pavement represent the basis of the forest opening up networks in Hungary. If properly maintained, asphalt pavements offer a high level of service. While traffic load of forest road networks have grown, expenses on their maintenance remained lower than required in the last three decades. As a result, these roads are in poor condition, generally. Renovation projects demand the knowledge of the roads' bearing capacity. Bearing capacity measurements of roads traditionally were carried out using the Benkelmann beam. The Benkelmann beam measurements provide the maximum vertical deflection of the pavement under 50 kN of wheel load. Nowadays the bearing capacity of public roads are measured



with falling weight deflectometers. Falling weight deflectometer measurements provide the full deflection basin. It is convenient to use these high precision instruments on forest roads, but their application is inefficient and costly. Researchers of the Department of Forest Opening Up developed a new method to measure the full deflection basin with the Benkelman beam. Besides the instrument improvement the authors developed a new method for the processing of the deflection basin data. New results are presented via the case study of a 2nd class opening up forest road.

**Keywords:** Benkelman-beam, forest road, bearing capacity, Pavement Management System

## BEVEZETÉS

Az útfenntartási rendszerek egyik legfontosabb, objektív úton mérhető paramétere az utak teherbírása. A hajlékony útpályaszerkezetek teherbírásának meghatározása azonban nem egzakt feladat, ehhez ugyanis nem rendelkezünk általánosan elfogadott elmélettel. Ha továbbmegyünk, azt is megállapíthatjuk, hogy a pályaszerkezet teherbírásának egyértelmű definiálása is nehézségekbe ütközik. A teherbírással ellentétben a merevség – mint adott terhelés hatására bekövetkező alakváltozás – definiálható, sőt mérhető. A „teherbírás” közvetlen meghatározása helyett általában a következő kérdésekre keressük a választ:

- Mekkora a pályaszerkezet hátralévő élettartama?
- A pályaszerkezet teherbírása és felületének állapota alapján melyik felújítási technológiát válasszuk?
- Milyen vastag erősítőréteg beépítésére van szükség ahhoz, hogy a pályaszerkezet a következő 10-20 év forgalmát elviselje?

Ez a közlemény ismerteti egy, az Erdőfeltárási Tanszéken kidolgozott eljárást, amellyel hajlékony pályaszerkezetek terhelés hatására bekövetkező alakváltozását lehet megmérni. Módszerünk előnye, hogy kis költségvetésű, „low cost” eszközök alkalmazásával is lehetővé teszi a teljes behajlási teknő megmérését.

## AZ ÚTBURKOLATOK ALAKVÁLTOZÁSÁNAK MÉRÉSE

A hajlékony útburkolatok alakváltozásának mérésére az elmúlt évtizedekben több eljárást is kidolgoztak. Mindegyik eljárás eltérő módon szimulálja a forgalom és a pályaszerkezet kapcsolatát. Ennek megfelelően a mért eredmények is kisebb-nagyobb mértékben eltérnek egymástól. A következőkben röviden bemutatjuk az erdészeti gyakorlatban eddig alkalmazott módszereket, a mérőeszközök főbb jellemzőit pedig összefoglalva az 1. táblázatban közöljük (Kosztka és mtsai 2008).

A behajlásmérés klasszikus eszköze a *Benkelman-gerenda*. A mérés alatt a terhelt tehergépkocsi ikerabroncsai közé a maximális behajlás helyén egy, a burkolatra támaszkodó vízszintes tengely körül forgó kart helyezünk el, és a burkolat függőleges elmozdulását a kar másik végén mért elmozdulásból lehetséges meghatározni. A mérés során a terhelő tehergépkocsi álló helyzetben van, így a terhelés statikus jellegű (Boromissza 1959).

A behajlások automatikus méréséhez a *Lacroix-mérőkocsi* alkalmazható. A mérés elve megegyezik a kézi behajlásmérés elvével, a különbség a mérés gyakorlati kivitelezésében rejlik; itt ugyanis a behajlásmérőket egy automata mérőkocsira függesztik, amely lassú (3–5 km/h) előrehaladás közben mintegy 4 m-enként méri a burkolat lehajlását. A *Lacroix-mérőkocsival* végzett behajlásmérési technika a mérés körülményessége és költséges volta miatt az erdészeti gyakorlatban nem terjedt el. Az Erdőfeltárási Tanszéken végzett korábbi kutatások ugyanakkor kimutatták, hogy az erdészeti utak felújítási terveinek tekintetében az egyszerűbb eszközöket igénylő kézi behajlásmérés is azonos eredményeket szolgáltat (Boromissza 1959; Kosztka és mtsai 2008).

A jelenlegi közúti gyakorlat hajlékony útburkolatok terhelés hatására bekövetkező alakváltozását, vagyis a behajlási teknőt nehéz ejtősúlyos (Falling Weight Deflectometer – FWD) berendezésekkel méri. Az FWD készülékek a dinamikus terhelés hatására bekövetkező függőleges elmozdulást a burkolaton elhelyezett gyorsulásmérő szenzorok segítségével több ponton egyszerre, nagy pontossággal mérik. A berendezés méri a levegő és a burkolat hőmérsékletét is. A dinamikus teherbírás mérés hazai alkalmazását megalapozó adaptációs vizsgálatok 1991-ben kezdődtek meg. Ezek alapján megállapítható, hogy a mérési eljárás gyors, szubjektivitástól mentes (Tóth 2007). A mérési technika – az utóbbi években szerzett tapasztalataink alapján – erdészeti körülmények között is előnyösen alkalmazható (Kosztka és mtsai 2008).

1. táblázat: A behajlásmérő eszközök összehasonlítása (Kosztka és mtsai 2008)  
Table 1: Properties of different bearing capacity measuring equipments

Jellemzők	Benkelman-tartó	Lacroix-mérőkocsi	FWD
Eszközigeny	terhelt tehergépkocsi 2 db Benkelman-tartó	mérőkocsi	mérőkocsi
Személyzet	4 fő	2 fő	2 fő
Igénybevétel	statikus	kvázi statikus	dinamikus
Szimulált sebesség	0 km/h	3-4 km/h	60-80 km/h
A mérés módja	diszkrét	folyamatos	diszkrét
A mérés sűrűsége	min. 25 m	4 m	25 m
Napi teljesítmény	15 km	20 km	15 km
Mért paraméter	központi behajlás	központi behajlás	behajlási teknő
Az adatok rögzítése	manuális	automatikus	automatikus
Ismételhetőség	kielégítő	közepes	kiváló
Az eszköz költsége	olcsó	drága	drága

## A KÉZI BEHAJLÁSMÉRÉS FEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEI

Az FWD készülékekkel való mérésekkel a központi behajlás mellett a burkolat alakváltozása több ponton is mérhető, ezáltal a lehajlási vonal (behajlási teknő) alakja is előállítható. A behajlási teknő alakjának ismeretében számíthatóvá válnak olyan paraméterek, amelyek a mechanikai

elveken alapuló pályaszerkezet-méretezési eljárások bemenő adatai. Véleményünk szerint a jövőben azokat a mérési eljárásokat kell előnyben részesíteni, amelyek lehetővé teszik a teljes behajlási teknő rögzítését. A nehéz ejtősúlyos eszközök beszerzési ára és fenntartási költsége igen magas, ezért az erdészeti utakon végzett teherbírásméréseket FWD-készülékkel rendelkező külső vállalkozó bevonásával lehetséges csak megoldani. Célszerűnek tűnik tehát egy olyan eljárás kidolgozása, amely az erdészeti utakkal foglalkozó szakemberek számára is lehetővé teszi a behajlási teknő önálló mérését.

## A GEOBEAM ÉS TÁRSAI

A Geobeam egy automatizált Benkelman-tartó, amelynek a fejlesztése az 1980-as években kezdődött (Tonkin&Taylor). A fejlesztés fő célja volt megőrizni a kézi behajlásmérés egyszerű alapelvét úgy, hogy közben a teljes deformációs vonal automatikusan rögzíthetővé váljon minimális költségnövekedés mellett. A mérés alatt a mérőgerenda érzékelője automatikusan rögzíti a függőleges elmozdulást úgy, hogy minden méréshez hozzárendeli a kerékterhelés pozícióját. Így a behajlási teknő megfelelő feldolgozó szoftver segítségével rekonstruálható. A kerékterhelés pozícióját a tehergépkocsihoz kapcsolt mérőkerékkel mérik és rögzítik. A mérőkerék felbontása 10 mm, ami igen sűrű mintavételezést tesz lehetővé. Az FWD készülékekkel ellentétben a Geobeam egy pont függőleges elmozdulását rögzíti eltérő időpillanatokban (Anderson 2008). A mérőrendszer az 1. ábrán látható.



1. ábra: A Geobeam eszköz (Geotechnics Ltd). [Anderson, 2008]

Figure 1: The Geobeam measuring equipment (Geotechnics Ltd.). [Anderson, 2008]

A Geobeam jól használható, reprezentatív mérési eredményeket szolgáltat olyan esetekben is, amikor a vízzel telített földmű miatt az FWD eszközök már nem alkalmazhatók megbízhatóan (konszolidáció kérdése) (Anderson 2008).

Természetesen a Geobeam mellett még számos más megoldás is létezik a kézi behajlásmérés korszerűsítésére. A teljesség igénye nélkül érdemes megemlíteni a weimari Bauhaus-Universität Építőmérnöki Karán alkalmazott kézi behajlásmérőt. Ennél a megoldásnál a központi érzékelő csúcs mellett további 3 mérőfejet is elhelyeztek 25–50–80 cm távolságra a terhelés tengelyétől. Az érzékelők által mért elmozdulást a mérőgerendára felszerelt elektronika dolgozza fel, és tárolja automatikusan. Ez a megoldás az FWD eszközökhöz hasonlóan egymástól eltérő diszkrét pontokban (4 mért pont) rögzíti az elmozdulásokat. A mérési pontokra illesztett függvény segítségével pedig már számíthatók a különféle teknőparaméterek (Dähnert 2005). Az eszközt a 2. ábra mutatja be.



2. ábra: Automatizált Benkelman-tartó. (Dähnert 2005)  
Figure 2: Automated Benkelman-beam. (Dähnert 2005)

## A TOVÁBBFEJLESZTETT KÉZI BEHAJLÁSMÉRŐ

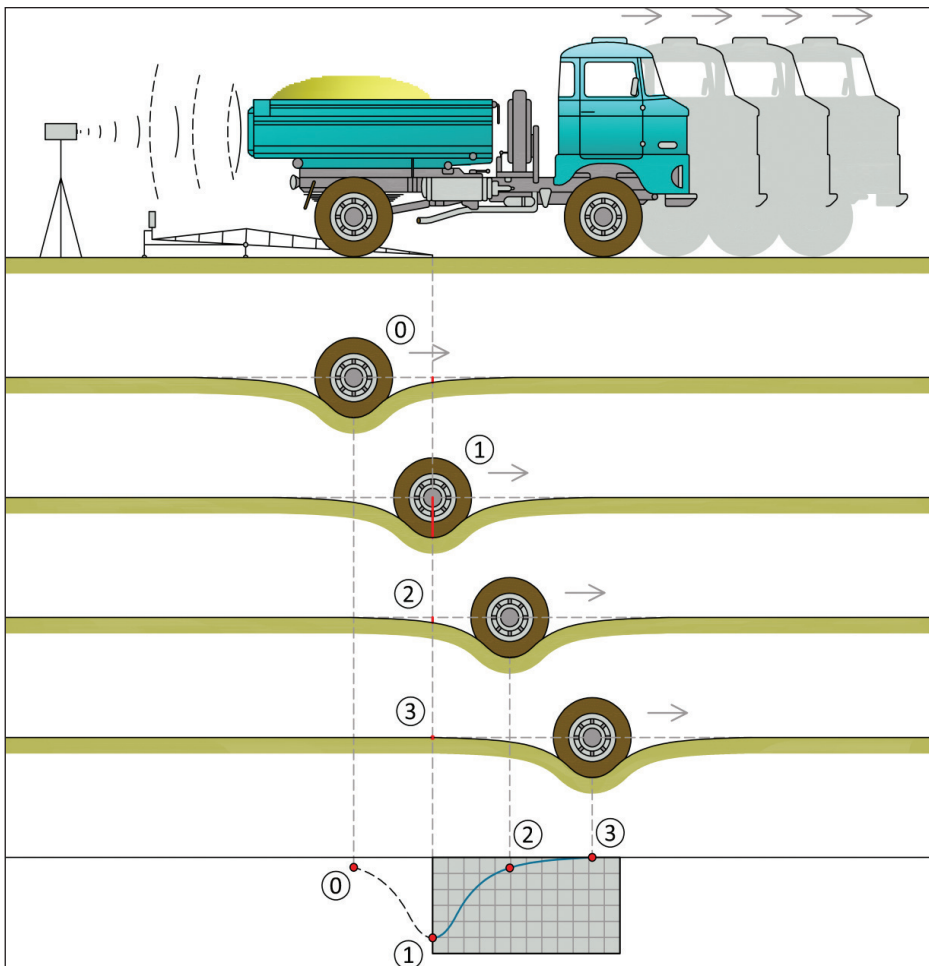
Az Erdőfeltárási Tanszéken kidolgozott eljárást a kézi behajlásmérés továbbfejlesztésével alakítottuk ki. A fejlesztés kiterjedt a mérési eljárás megtervezésére, a szükséges kiegészítő eszközök kiválasztására, a központi adatgyűjtő egység tervezésére és építésére, az adatgyűjtő hardveren futó firmware, valamint a PC-ken futó adatgyűjtő és elemző szoftverek kifejlesztésére.

Az eszközök fejlesztése alapvetően három pilléren nyugszik:

1. A hagyományos Benkelman-tartók analóg mérőóráit digitális adatkimenettel rendelkező mérőórákra cseréltük.
2. A mérés során a tehergépkocsi előrehaladását ultrahangos távolságmérővel rögzítjük.
3. A digitális szenzorok jelét a saját fejlesztésű központi vezérlő egység gyűjti, majd továbbítja az adatgyűjtő szoftvert futtató netbooknak.

A mérés a következő lépésekből áll (3. ábra):

1. Ismert hátsó tengelysúlyú, terhelt tehergépkocsi felállása a mérés szelvényébe.
2. A behajlasmérők elhelyezése a hátsó (szóló) tengely ikerabroncsai közé úgy, hogy a mérőcsúcs a kerék felfekvési vonala előtt legyen.
3. A digitális elmozdulásmérő órák mérési pozícióba állítása.
4. Az állványra szerelt ultrahangos távolságmérő mérési pozícióba állítása.
5. Az adatgyűjtő szoftvert futtató számítógép (érintőképernyős netbook) előkészítése a mérési adatok fogadására, az adatkapcsolat ellenőrzése a külső hardverekkel.
6. Az adatgyűjtő szoftveren az adatgyűjtés indítása.
7. A tehergépkocsi lassú előrehaladása közben az adatgyűjtő szoftver rögzíti a digitális mérőórák, valamint a távolságmérő szenzor mérési adatait.
8. A tehergépkocsi 5 m-es előrehaladását követően az adatgyűjtés automatikus leállítása.



3. ábra: A továbbfejlesztett kézi behajlasmérés elve

Figure 3: Measurement process of the Advanced Benkelman Beam Apparatus

A mérőeszköz tehát a burkolat egy pontjának függőleges elmozdulását rögzíti oly módon, hogy az elmozdulásmérő órák minden „leolvasásához” hozzárendeli az elektronika a kerékterhelés távolságát is. Az így nyert adatsor megfelelő előfeldolgozását követően előállítható a behajlási teknő alakja.

## HARDVERELEMEK

A Benkelman-tartóra szerelt digitális mérőóra típusának kiválasztásakor a következő szempontokat vettük figyelembe:

- legalább 0,01 mm felbontás;
- minimum 10 Hz mérési frekvencia;
- minimum 25 mm mérési tartomány;
- nyílt formátumú digitális adatkimenet;
- robosztus, kültéri mérésekre alkalmas kialakítás;
- az analóg mérőóráinkkal megegyező átmérőjű (8 mm) szár;
- kedvező ár.

A piacon elérhető kínálat tanulmányozását követően választásunk a Mitutoyo cég ID-U típusú mérőórájára esett. A Mitutoyo cég a precíziós mérőeszközök egyik vezető gyártója, az ID-U mérőóra a felsorolt követelményeknek teljes mértékben megfelel. A mérőóra digitális adatkimenettel rendelkezik, a mellékelt adatkábelek végén szabványos csatlakozókkal lehet az eszközt a cég által gyártott vagy saját fejlesztésű adatgyűjtőhöz kötni. A Mitutoyo cég DIGIMATIC néven kifejlesztett digitális adatcsere-formátuma jól dokumentált, könnyen kezelhető. A kommunikáció hardveres megvalósítása – logikai jelszintek, időzítés, külső vezérelhetőség stb. – lehetővé teszi a szenzor saját fejlesztésű mikrokontrolleres környezetbe való illesztését. A tehergépkocsi előrehaladását egy SRF-08 típusú ultrahangos távolságmérő szenzorral rögzítjük. A szenzor fontosabb jellemzői:

- 1 cm felbontás,
- 30 cm – 6 m mérési tartomány,
- nagy mintavételezési gyakoriság (> 20 Hz),
- I2C szabványú kommunikáció,
- alacsony ár.

A szenzort a következőkben bemutatott központi adatgyűjtő egység műszerházába építettük be. A központi adatgyűjtő és vezérlő egység egy Microchip 18F2550 típusú mikrokontroller köré épül. A műszeregység „agyának” feladatai:

- USB HID szabványú kommunikációs protokollon keresztül kapcsolat fenntartása, adatcsere a PC-n futó adatgyűjtő szoftverrel;
- a digitális elmozdulásmérő órák és a távolságmérő szenzor méréseinek szinkronizált indítása 10 mérés/mp gyakorisággal;
- a szenzorok mérési eredményeinek fogadása, átalakítása;
- a mérési eredmények továbbítása az adatgyűjtő szoftvernek.



4. ábra: A központi adatgyűjtő-vezérlő egység  
Figure 4: Central data logging unit



5. ábra: A műszeregység a gyakorlatban  
Figure 5: Advanced Benkelman Beam Apparatus in the field



Az adatgyűjtő-vezérlő egység tápellátását a csatlakoztatott PC USB portja biztosítja. A mikrokontroller és a köré épített alkatrészek egy saját tervezésű és kivitelezésű nyomtatott áramkörön foglalnak helyet. A mikrokontrolleren futó programot (firmware-t) a Microchip MPLAB fejlesztő-eszköz oktatási verziójával, C nyelven írtuk. A vezérlő egységet egy műanyag műszerházban helyeztük el, amelyet gyorscsatlakozóval fényképezőgép-állványra lehet rögzíteni. Az adatgyűjtő szoftvert egy Vye típusú érintőképernyős netbookon futtatjuk. Az adatgyűjtő-vezérlő egységet a 4. ábra, az összeállított műszeregyüttest az 5. ábra mutatja be.

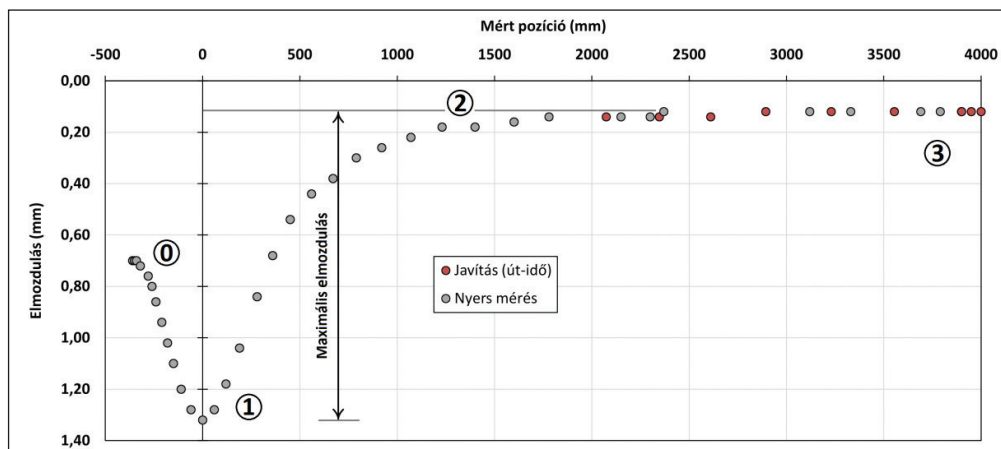
## SZOFTVERELEMEK

A mérések terepi kivitelezésénél a netbookon futtatott program a vezérlést, a mért adatok előfeldolgozását és a mérési eredmények tárolását támogatja. A mérési eredmények irodai feldolgozásának támogatásához írt program az alábbi funkciókat nyújtja:

- a mérési adatsor kiegyenlítése;
- a behajlási teknő alakját jól leíró, a mechanikai számításoknak megfelelő függvény numerikus meghatározása;
- az illesztett függvények segítségével a behajlási teknő alakjára, illetve a teherbírásra jellemző paraméterek (behajlási teknő hossza, inflexiós pont helye, minimális görbületi sugár, központi deformáció, alaktényező) meghatározása.

## A mérési eredmények előfeldolgozása

Az Erdőfeltárási Tanszéken továbbfejlesztett kézi behajlasmérő általános ismertetése után célszerű a rögzített adatsorok tulajdonságait is áttekinteni. Az adatgyűjtő szoftver a mérések alatt rögzíti a digitális mérőórak által „leolvasott” elmozdulásokat ( $d$ ), rögzíti a kerékterhelés pillanatnyi távolságát ( $x$ ), valamint a mérés indítása óta eltelt időt ( $t$ ). A rögzített behajlási teknő alakját az  $f : x \rightarrow d$  függvénykapcsolat egyértelműen meghatározza (6. ábra).

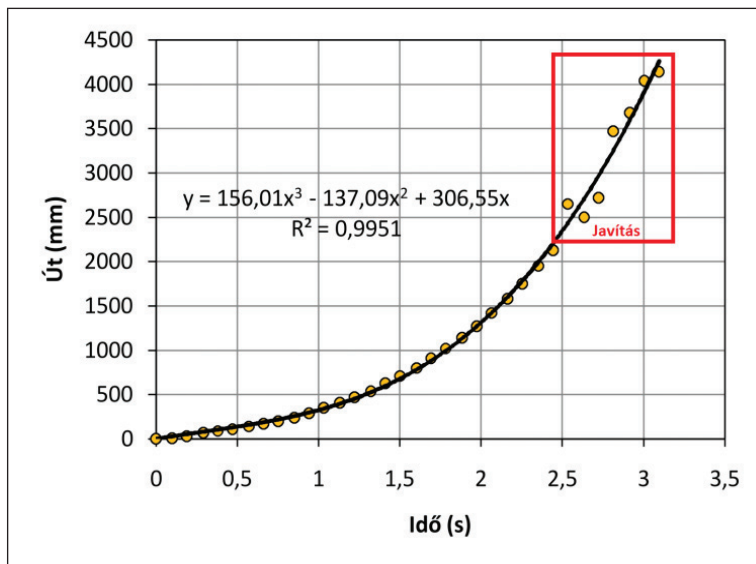


6. ábra: A behajlási teknő rögzített pontjai

Figure 6: Measured points of the deflection basin. Red dots represent corrected measurements

A nyers mérési adatsoron jól látható, hogy a mérés során a behajlászó csúcsa a kerék fel-fekvési vonala előtt helyezkedik el kb. 40-50 cm-re. A mérés indításakor a kerékterhelés hatására először a pályaszerkezet fokozatosan növekvő alakváltozást szenved (0-1), majd amikor a mérőcsúcs fölé ér, eléri az alakváltozás a maximumát (1). Ahogy a kerék továbbhalad a mérőcsúcson, a pályaszerkezet fokozatosan visszanyeri eredeti alakját (2-3). Az így kialakuló deformációs vonalat a mérőeszköz 5 m hosszan képes rögzíteni.

A nyers adatokon az is megfigyelhető, hogy azok határozott trend mellett kisebb-nagyobb mértékben ingadoznak, vagyis zaj terheli őket. A behajlási teknőt leíró adatpárok  $(x, d)$  mindkét tagját mérési hiba terheli, amelynek a mértéke az adott paramétert rögzítő szenzor jellemzőitől függ. A rögzített három paraméter közül az idő  $(t)$  mérése a legmegbízhatóbb, ezután következik az elmozdulás  $(d)$ , végül pedig a mozgó kerékterhelés  $(x)$ . A zajszűrést tehát az  $x$  paraméter vizsgálatával célszerű kezdeni. Az út-idő diagram az idő függvényében a kerékterhelés által megtett út szemléletes ábrázolása (7. ábra). Jól végigkövethető rajta, hogy a mozgó kerékterhelés folyamatos gyorsulást végez. A teljes terhelési idő 3 másodperc körüli, azaz a kerékesesség átlagosan 5 km/h. Ez az érték hasonló a Lacroix-mérőkocsik mérősebségéhez, ezért a mérés nem statikus, hanem kvázi statikus jellegű. Az is megfigyelhető, hogy az ultrahangos távmérő utolsó 5-10 rögzített értéke (pirosan keretezett rész) hibával terhelt, így azokat érdemes a teljes mérési sorra illesztett regressziós függvénnyel vagy spline görbével helyettesíteni. Ezzel a módszerrel viszonylag megbízhatóan lehetséges a távmérésből eredő hibákat kiszűrni és azokat javítani (lásd a 6. ábra javított értékeit).

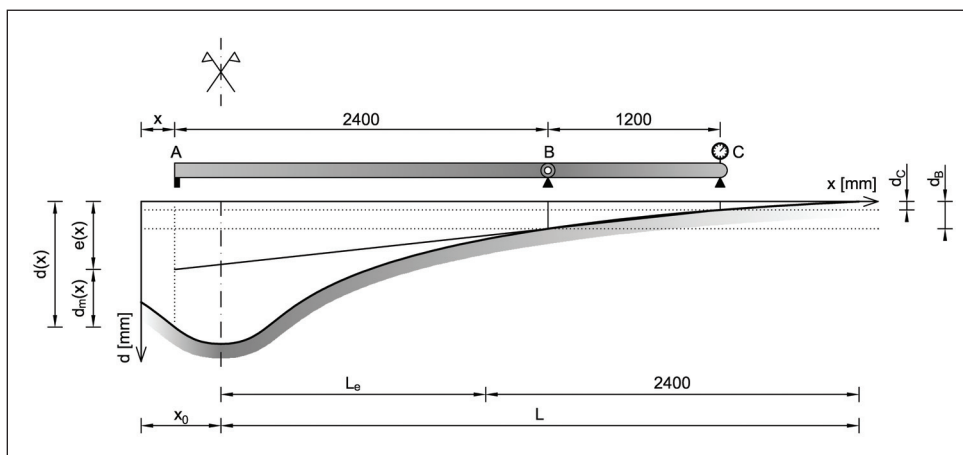


7. ábra: A továbbfejlesztett kézi behajlászó jellemző út-idő diagramja

Figure 7: Distance-time diagram of one measurement. Notice the measurement errors in the red box

A kézi behajlászó alátámasztásának elvileg olyan távol kell lennie a terhelt gumibroncsoktól, hogy az alátámasztás a pályaszerkezet mozgásában már ne vegyen részt. Ellenkező

esetben a mért értékeket ún. talphiba ( $e$ ) terheli (8. ábra). Hazai viszonylatban is megerősített tapasztalatok alapján a vékony pályaszerkezeteknél az ebből származó hiba jelentős mértékű lehet (Kosztka 1978). A vázolt probléma miatt terjedtek el világszerte a 2:1 arányú mérőkarral rendelkező Benkelman-tartók. Az ilyen kialakítású berendezéseknél a mérőcsúcs ( $A$ ) és a talppont ( $B$ ) közötti távolság kétszerese a talppont ( $B$ ) és a mérőóra ( $C$ ) közötti távolságnak. Ez a túlnyújtás általában elég arra, hogy a lábak deformációmentes helyre kerüljenek, a műszer hossza pedig még nem befolyásolja a kezelhetőséget [Kosztka, 1986]. Minden ilyen irányú fejlesztés ellenére a talphibával továbbra is számolni kell, mivel annak mértéke a pályaszerkezetekre jellemző ún. együtdolgozó hossz nagyságától függ (Boromissza 1959). Ez az érték pedig igen tág határok között változhat.



8. ábra: A mérőkar alátámasztásából származó talphiba ( $e$ )  
Figure 8: Measurement error caused by the deflection basin itself

A továbbfejlesztett kézi behajlásmérő a terhelés hatására kialakuló deformációs vonalat 5 m hosszon képes rögzíteni, így lehetőség nyílik a talphiba becslésére mérési pontonként:

$$e(x) = (d_B(x) - d_C(x)) \cdot \frac{3600}{1200} + d_C(x) = 3 \cdot d_B(x) - 2 \cdot d_C(x) \quad (1),$$

ahol:

$e(x)$  : a mérőcsúctól  $x$  távolságban jelentkező talphiba mértéke (mm);

$d_B(x)$  : a talppontonál mért elmozdulás (mm);

$d_C(x)$  : a mérőóránál mért elmozdulás (mm);

3600 : a behajlásmérő teljes hossza (mm),

1200 : a behajlásmérő B és C pontjának távolsága (mm).



A talphiba figyelembevételére a behajlási teknő „Le” hosszúságú, talphibával terhelt szakaszán van szükség. A talphiba figyelembevételével számítható a lehajlási vonal x koordinátájú pontjának korrigált értéke:

$$d(x) = d_m(x) + e(x) \quad (2),$$

ahol:

$d(x)$ : a behajlás értéke, ha a terhelés tengelye a mérőcsúcstól x távolságra helyezkedik el (mm);

$d_m(x)$ : a mért behajlás a mérőcsúcstól x távolságra (mm);

$e(x)$ : a mérőcsúcstól x távolságban jelentkező talphiba mértéke (mm).

### A mérési eredmények értékelése

A terepi méréseket és az előfeldolgozást követően a mérési eredmények értékelésének első lépése, hogy a mért pontokra numerikus módon egy, a teknőalakot jól reprezentáló függvényt illesztünk:

$$(x) = \frac{d_0 \cdot 4 \cdot r^2}{c \cdot x^2 + 4 \cdot r^2} = \frac{d_0}{c \cdot \left(\frac{x}{d}\right)^2 + 1} \quad (3),$$

ahol:

$d_0$  = a terhelt tárcsa alatti maximális behajlás (mm);

$r$  = a terhelt tárcsa sugara (mm);

$c$  = a behajlási teknő alakjára jellemző alaktényező;

$x$  = a terhelés középpontjától való távolság (mm).

Az alkalmazott függvény előnyös tulajdonsága, hogy folytonosan differenciálható; az első és a második derivált is tetszőleges x helyen számítható. A függvény segítségével az összetett méréssorozatot (a behajlási teknőt) két mérőszámmal ( $D_0$ ,  $c$ ) egyértelműen jellemezni tudjuk. A javasolt függvényalak részletes leírását Primusz és Tóth (2009) tárgyalja.

### A burkolat merevségére jellemző mérőszámok

A behajlási teknő alakját leíró függvényt az  $x = 0$  helyen érintő körív sugara zárt alakban számítható, a képlet az alábbi:

$$R_0 = \frac{2 \cdot r^2}{c \cdot D_0} \quad (4),$$

ahol:

$R_0$  = görbületi sugár (mm);

$D_0$  = a terhelés helyén mért maximális behajlás (mm);

$r$  = az idealizált, kör alakú terhelési felület sugara (mm), értékét jellemzően 150 mm-re vesszük fel.

A minimális görbületi sugár a központi behajlás mellett egy, a burkolat alakváltozását könnyen értelmezhető módon leíró érték. Belátható, hogy ha a burkolatot az ismétlődő terhelések kis sugarú ív mentén hajlítják meg, akkor az hamarabb tönkremegy (fáradás). A minimális görbületi sugár és az aszfaltrétegek vastagságának ismeretében számíthatóvá válik az aszfalt réteg alsó szálának megnyúlása:

$$\varepsilon = \frac{h}{2 \cdot R} \quad (5),$$

ahol:

$\varepsilon$  = az aszfaltrétegek alsó szálának megnyúlása (m/m);

$h$  = kötött rétegek vastagsága (m);

$R$  = görbületi sugár (m).

A megnyúlást általában  $\mu$ strain-ben ( $\mu\text{m/m}$ ) adjuk meg, ehhez a (m/m) dimenzióban kapott értéket  $10^6$ -al meg kell szorozni. A megnyúlás az aszfalt pályaszerkezeti rétegek fáradási tönkremenetelének egyik fontos paramétere, a burkolatok hátralévő élettartamának számításához nélkülözhetetlen. A behajlási teknő alakját leíró függvény inflexiós pontjának távolsága a terhelés helyétől mérve (merevségi sugár):

$$L = \frac{2 \cdot r}{\sqrt{3 \cdot c}} \quad (6)$$

ahol:

$L$  = merevségi sugár (mm);

$c$  = a behajlási teknő alakjára jellemző alaktényező;

$r$  = az idealizált, kör alakú terhelési felület sugara (mm).

Az Erdőfeltárási Tanszéken a közelmúltban folytatott kutatások (Primusz és Markó 2010) kimutatták, hogy a merevségi sugár és a kohézióval rendelkező burkolati rétegek (aszfalt) vastagságának ismeretében számíthatóvá válnak a pályaszerkezet kötött rétegeinek (aszfalt), illetve az alatta elhelyezkedő nem kötött rétegek (alaprétegek + földmű) rugalmassági modulusai.

## A módszer alkalmazása a hármastarjáni erdészeti feltáróúton

A továbbfejlesztett kézi behajlasmérő első gyakorlati alkalmazása a Kisalföldi Erdőgazdaság Zrt. Ravazdi Erdészetének hármastarjáni másodosztályú erdészeti feltáróútján valósult meg. A behajlasmérést mindkét keréknyomban 50 méterenkénti mintavételezéssel hajtottuk végre. A mérőeszköz prototípusa és a mérési eljárás egyaránt bizonyította, hogy alkalmas üzemszerű körülmények közötti használatra. A mérések időigényét vizsgálva megállapítható, hogy az eljárással 50 méterenkénti mintavételezéssel kb. 1 km hosszúságú útszakasz mérhető meg egy óra alatt.

A terepi méréseket követően a behajlásméréseket a korábban már bemutatott szoftverrel dolgoztuk fel. A mérési pontokban az alábbi paramétereket határoztuk meg:

- központi behajlás ( $D_0$ , mm),
- behajlási teknő alaktényezője ( $c$ ),
- minimális görbületi sugár ( $R$ , m),
- kötött rétegek rugalmassági modulusa ( $E_k$ , Mpa),
- nem kötött rétegek rugalmassági modulusa ( $E_{nk}$ , Mpa).

A mérési helyenként egyedileg meghatározott értékeket ezután a Tanszéken fejlesztett „RR” nevű programmal állapotértékelési hossz-szelvényen ábrázoltuk, majd az azonos állapotúnak tekintett homogén szakaszokat lehatároltuk. A homogén szakaszokra az előbbi paraméterek mértékadó értékét számítottuk, majd a további elemzéseket ezekkel az értékekkel folytattuk. Az állapotjelző paraméterek mértékadó értékeit a 2. táblázatban foglaltuk össze.

2. táblázat: *Állapotjelző paraméterek mértékadó értékei*  
Table 2: *Calculated bearing capacity parameters of the studied avement*

Homogén szakaszok határszelvénye	Központi behajlás	Görbületi sugár	Az aszfalt megnyúlása	Modulusok	
				Kötött burkolati rétegek	Nem kötött burkolat + földmű
(hm)	$D_0$ (mm)	R (m)	$\varepsilon$ (microstrain)	$E_k$ (Mpa)	$E_{nk}$ (Mpa)
0+00	1,25	98	306	3620	84
2+25					
11+25	1,85	61	492	2390	64
	1,29	99	303	3660	99
21+75	1,26	64	469	1990	94
28+25					
31+75	0,89	107	280	3490	106
	1,1	72	417	2560	116
39+00					

## ÖSSZEFOGLALÁS, KÖVETKEZTETÉSEK

A mérőeszköz prototípusa és a mérési eljárás egyaránt bizonyította, hogy alkalmas üzemszerű körülmények közötti használatra. A mérések időigényét vizsgálva megállapítható, hogy az eljárással 50 méterenkénti mintavételezéssel egy óra alatt mintegy 1 km hosszúságú útszakasz mérhető meg.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A tanulmányban bemutatott fejlesztések létrejöttét a NymE-ERFARET Nonprofit Kft. és a Kisalföldi Erdőgazdaság Zrt. által 2010-ben megkötött kutatási-fejlesztési megállapodás tette lehetővé. Külön köszönet illeti Balázs László technikust valamint Kisfaludi Balázs és Biczó Balázs doktoranduszokat a terepi mérések során nyújtott segítségükért.

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- Anderson, S. 2008: Pavement Deflection Measurements Using the Geobeam. Mechanistic Design and Evaluation of Pavements, 2008 Workshop, link: <http://www.pavementanalysis.com>
- Boromisza T. 1959: Útburkolatok behajlása. Mélyépítéstudományi Szemle, 1959/12: 564-571.
- Dähnert, M. 2005: Messwertgestützte Ermittlung der Tragfähigkeit von bestehenden Strassen, Diplomarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Verkehrsbau, 2005
- Kosztka M. 1978: Erdei utak pályaszerkezetének teherbírása. Kézirat. Erdészeti és faipari tudományos ülés, Budapest, 1978.
- Kosztka M. 1986: Erdészeti utak fenntartási rendszere. Kandidátusi értekezés. Sopron, 1986
- Kosztka M., Markó G.; Péterfalvi J.; Primusz P. és Tóth Cs. 2008: Erdészeti utak teherbírásának mérése. A Magyar Tudományos Akadémia, Agrártudományok Osztálya, Agrárműszaki Bizottság, XXXII. Kutatási és fejlesztési tanácskozás, 2008. január 22., Gödöllő, 2008. 32/3: 75–79.
- Péterfalvi J., Markó G. és Primusz P. 2010: Az erdészeti utak teherbírásmérési módszerének továbbfejlesztése a KAEG Zrt. hármastarjáni erdészeti útjának példáján. NymE-ERFARET Kutatási Jelentés, Erdőmérnöki Kar, Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet, Sopron, 2010.
- Primusz P. és Tóth Cs. 2009: A behajlási teknő geometriája. Közlekedésépítési Szemle, 2009/12 (59): 18–24,28.
- Primusz P. és Markó G. 2010: Kétrétegű pályaszerkezet-modellek paramétereinek meghatározása FWD mérések alapján. Közlekedésépítési Szemle, 2010/7 (60): 8–13.
- Tóth Cs. 2007: A teherbíró képesség meghatározásának ellentmondásai és lehetőségei. Közúti és Mélyépítési Szemle, 2007/8 (57): 13–20.

*Érkezett: 2012. április 6.*

*Közlésre elfogadva: 2012. szeptember 3.*