



## Közlekedési pályák teherbíró-képessége, a földmű hatásai

**Karoliny Márton**

### KIVONAT

Az útpályaszerkezetek hosszú távú használhatóságát az alátámasztó földmű alapvetően befolyásolja. Ez a befolyás ugyan ismert az építőmérnöki körökben, de a mértékének számszerűsítésére viszonylag kevés a gyakorlatban is alkalmazott módszer létezik. Mivel a földmű a teherhordó szerkezetek közül az egyik legérzékenyebb a környezet (meteorológiai) hatásokra és a változásokra, az első részben a gyakorlatban is alkalmazható eljárás lett ismertetve, kitérve a hatások eloszlásának ismeretében alkalmazható károsodás összegzés lehetőségére illetve ezek szimulációs célokra való felhasználásra.

A második részben a gyakorlatban alkalmazott mérés technika metrológiai és fizikai tartalomra vonatkozó kritikája van kifejtve és be van mutatva az az eszközrendszer, ami a szeizmikus elven működő eszközök előnyeit és alkalmazásának lehetőségeit mutatja, különös tekintettel a terhelés tengelyén kívül is megmért behajlásértékek használhatóságára.

A harmadik rész a földművek anyagtulajdonságainak a merevség és részben a ciklikus terhelések hatására bekövetkező térfogatváltozási hajlamára gyakorolt hatásáról, az ellenállóképesség lehetséges növeléséről és végül egy viszonylag egyszerű mérési módszer lehetőségéről szól, amivel az elkészült, vagy a működő földmű viselkedését a potenciális hossz és keresztirányú alakváltozások szempontjából meg lehet ítélni. *Kulcsszavak:* behajlási teknő, paraméterek, egyenértékű felületi modulus, IRI (international roughness index), merevség, teherbíróképeség

*Kulcsszavak:* behajlási teknő paraméterek, egyenértékű felületi modulus, IRI (international roughness index), merevség, teherbíróképeség

### ABSTRACT

The long term utility of pavement structures is basically affected by the supporting subgrade. This effect is well-known among the civil engineers, however, there are relatively few methods applied in practice to express its extent in numbers. As the subgrade is one of the most sensitive bearing structures that is sensitive to environmental (meteorological) impacts and changes, a procedure adoptable in practice was presented in the first part also mentioning the possibility of damage summary being aware of the impact distribution and the application of those for simulation. In the second part critique is developed concerning the measuring technology of the metrological and physical contents applied in practice and the set of devices is presented, which shows the advantages and the possibilities of application of the devices working by seismic principal with especial regard to the application of deflection values measured out of the axle of the load. The third part is about the effects of the disposition of the stiffness of soil material properties and the volume change resulting partly in cyclical loads, the possible increase of resistance and a possibility of a relatively simple measuring method with which the behaviour of the completed or the working subgrade can be judged from the point of view of the potential longitudinal and transversal transformation.

### **Karoliny Márton**

*Okleveles építőmérnök, szakmérnök, mérnök-közgazdász. A MAUT Útpályaszerkezetek szakbizottság elnöke, jelenleg aktív, szakmai tanácsadással foglalkozó nyugdíjas. Pályájának első részében közútkezelőként (hidmérnök, majd fejlesztési osztályvezető) majd a kivitelező építőiparban műszaki igazgatóként illetve ügyvezetőként dolgozott. 1993-tól a többszörös átalakuláson átment, ma STRABAG-ként nevezhető konszern technológiafejlesztési, minőségellenőrzési illetve innovációs egységét vezette 2008-ig, azóta a jelenlegi foglalkozását űzi. Számos konszernben belüli és külső megbízásra végrehajtott*

*műszaki fejlesztési projekt vezetésében közvetlenül is részt vett. Alapvető szakmai érdeklődési területe az útpályaszerkezetek méretezési, technológiatervezési és minőségbiztosítási kérdései. Írott publikációjainak száma több, mint 30, évente 4-5 konferencián, workshopon előadásokat tart.*

## 1. FOGALOMMEGHATÁROZÁSOK

A cikkben néhány útpályaszerkezeti, szilárdságtani és technológiai jellegű fogalmat használok, a jobb érthetőség miatt előzetesen megadom ezek meghatározását.

- **teherbíró képesség:** az útpályaszerkezet ellenálló képessége a forgalmi és környezeti terhelésekkel szemben, a szükséges tulajdonságok (egyenletesség, profilhelyesség, felületépség stb.) megtartása kellő ideig
- **merevség:** egy, az útpályaszerkezetet alkotó rétegnek a terhelés hatására létrejövő alakváltozással (behajlás) szembeni ellenálló képessége
- **egyenértékű felületi modulus:** teherviselő, egy vagy több rétegből álló rendszer felületén megmért behajlásból számítható, a teljes rendszer merevségét jellemző modulusérték, kiszámítható a következő módon (Boussinesque)

$$E = f * (1 - \nu^2) * \sigma * \left(\frac{a}{s}\right) \quad (1)$$

ahol:

E - az egyenértékű felületi modulus (MPa)

f - erő eloszlás tényező (-)

$\nu$  - Poisson tényező (-)

$\sigma$  - a terhelő feszültség (MPa)

s - a terhelt tárcsa alatti behajlás (mm)

a - a terhelő tárcsa sugara (mm)

behajlási teknő paraméterek: a terhelés hatására létrejövő behajlási teknő alakját jellemző különbségértékek, a tapasztalatok alapján ezek jól jellemzik az adott mélységi tartományban lévő réteg merevségét, kiszámíthatók a következő módon:

$$SCI = S_0 - S_{300} \quad (2)$$

$$BDI = S_{300} - S_{600} \quad (3)$$

$$BCI = S_{600} - S_{900} \quad (4)$$

ahol:

$S_0$  - a terhelés tengelyében mért behajlás (microméter)

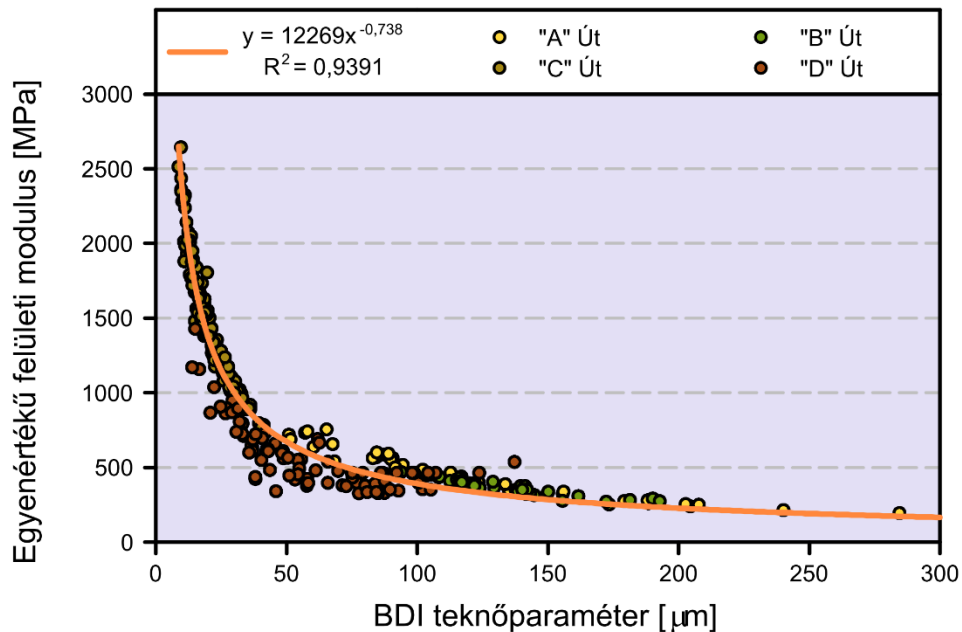
$S_{300,600,900}$  - a terhelés tengelyétől az indexben lévő távolságban mért behajlás (microméter)

**IRI** (international roughness index): az útpályaszerkezet felületi egyenletességét mutató mérőszám mm/m, vagy m/km dimenzióban, meghatározható speciális mérőberendezéssel

## 2. BEVEZETÉS, PROBLÉMAMEGFOGALMAZÁS

Az építőmérnöki közbeszédben közhelyszámba megy a földmű hatásának jelentősége az útpályaszerkezet teherbírásával kapcsolatban.

Ugyanakkor ezen hatás számszerűsítésére már lényegesen kevesebb erőfeszítés történik, pedig ehhez számos adat áll rendelkezésre, akár az állapotfelvételi, akár az átadási mérések jóvoltából.



1. ábra: Földmű merevség hatása a pályaszerkezet merevségére

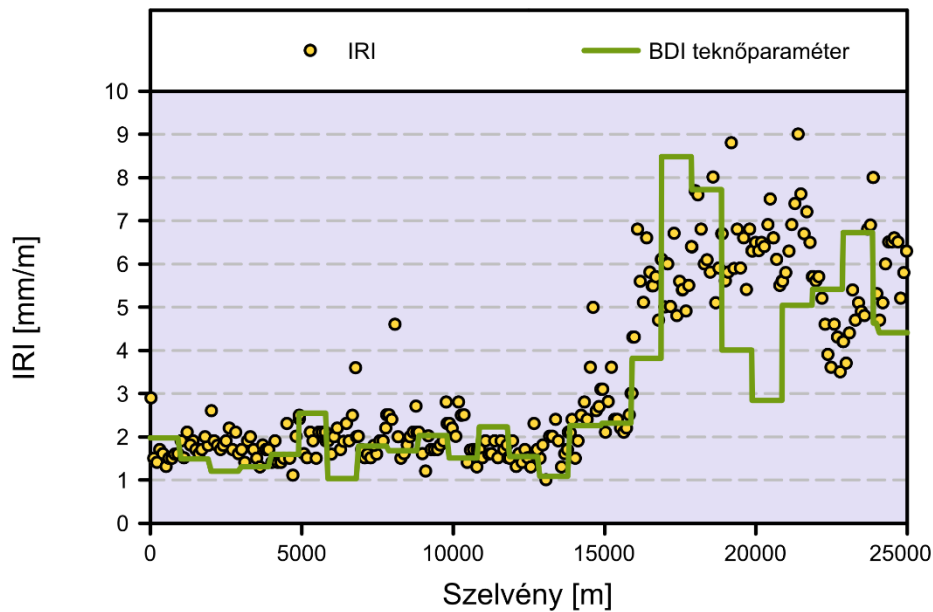
Az 1. diagramon négy különböző út behajlásmérési adatait dolgoztam fel.

Jól látható, hogy a pályaszerkezet merevségét jellemző egyenértékű felületi modulus utanként külön-külön, de egyesítve is milyen jelentős mértékben függ a földműmerevséget jellemző teknőparaméter értékétől.

Az útpályaszerkezet merevsége nagyon fontos a közútkezelők számára, de az úthasználókat elsősorban a felületi tulajdonságok, így a felületi egyenletesség, a deformációmentesség és a felületépség érdekli.

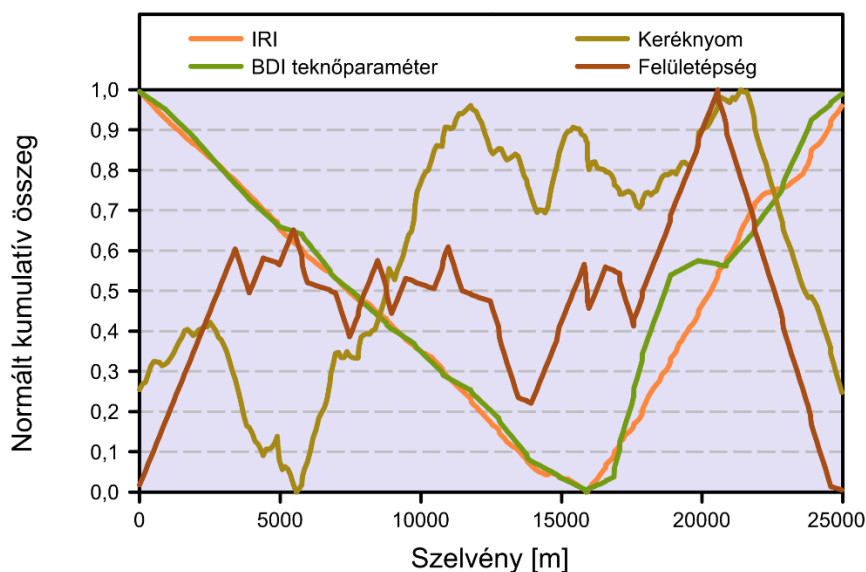
Miután az állapotfelvételi mérések erre is kiterjednek, megvizsgáltam, hogy egy út esetében milyen a kapcsolat az IRI és a teknőparaméter között.

A 2. diagramon a kapcsolat nagyon is jól felismerhető, azaz a földműmerevségnek a kialakult felületi egyenletességre is jelentős hatása van.



2. ábra: Felületi egyenletesség és a földmű merevség kapcsolata

Megszerkesztettem a felsorolt összes felületi tulajdonság és a földműmerevség indikátor homogén szakaszait az ún. kumulatív összeg módszerével.



3. ábra: Állapotparaméterek homogén szakaszai

Az IRI és a földműmerevség homogén szakaszai gyakorlatilag összeesnek, a másik két tulajdonság esetében gyakorlott szem a hasonló tendenciákat jól felismeri.

Megjegyzendő, hogy a felületi egyenletességnek nemcsak az utazási komfortra és a közlekedésbiztonságra van jelentős hatása, hanem a jármű üzemköltségére és a káros emissziókra is.

Látható tehát, hogy a földmű tulajdonságának a hatása igenis számszerűsíthető és ez a hatás jelentős.

A számomra fontos kérdés ezek után az, hogy kialakult gyakorlatunk ezt a hatást mennyire veszi figyelembe a létesítés (tervezés, megépítés) és a működtetés (üzemeltetés, fenntartás) során, azaz milyen prognosztizációs eszközeink vannak, milyen modelleket alkalmazunk és hogyan vesszük figyelembe a környezet változásait, kvantifikálható módon.

A feladat ugyanis az, hogy a fontos tulajdonságok megfelelő szintjét hosszú távon meg tudjuk tartani, más szóval a teherbíró képességet (Ullidzt (1)), mint a forgalmi és környezeti hatásokkal szembeni

ellenálló képességet előre meg kell tervezni, a megépítés során a kívánt szintet biztosítani kell és a működés során ezt a képességet fenn kell tartani, a gazdaságosság követelményét is figyelembe véve.

Ez a cikk ilyen kérdésekkel foglalkozik.

### 3. AZ ÚTPÁLYASZERKEZET MEREVSÉGÉNEK VÁLTOZÁSAI A FÖLDMŰ HATÁSÁRA

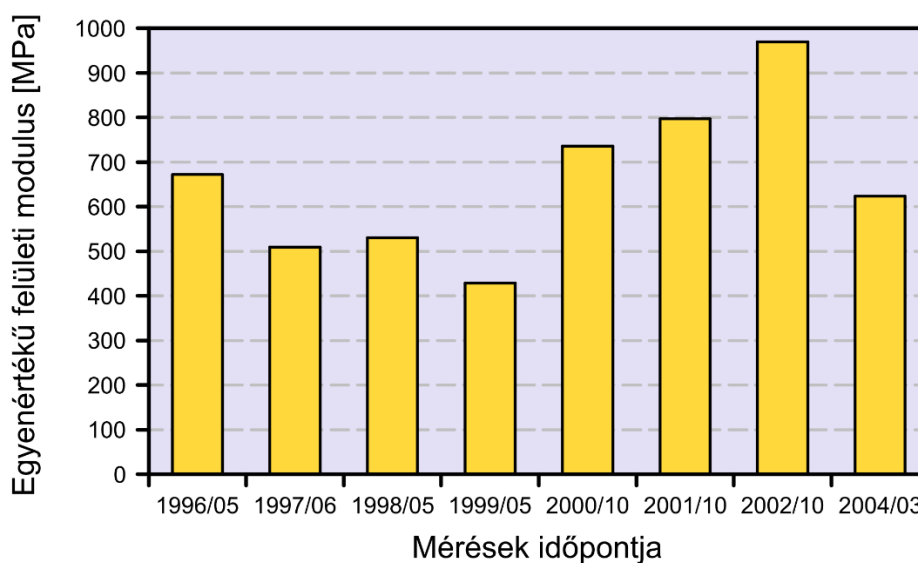
Az 1. diagram jól mutatja a földműmerevségnek a pályaszerkezet merevségére gyakorolt hatását.

Korán felismerték, hogy a földmű merevsége nem állandó, hanem bizonyos ciklikus – évszakfüggő – változásokat mutat.

Nyilvánvaló, hogy ezek a változások a pályaszerkezet merevségére is kihatnak.

Ebben a pontban ezen változások meghatározásának és prognosztizálásának lehetőségeit vizsgálom meg.

#### 3.1. EGY ETALONSZAKASZ PÁLYASZERKEZET MEREVSÉGVÁLTOZÁSAI



4. ábra: Útpályaszerkezet merevségének változása

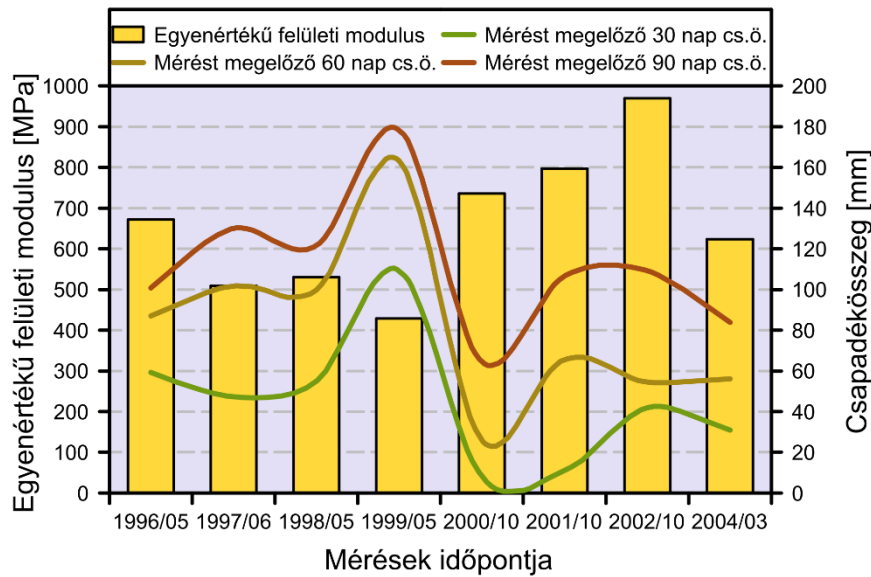
Az országos közúthálózaton viszonylagos rendszerességgel behajlásméréseket hajtanak végre.

Ezek közül egy ún. etalonszakasz behajlásméréseit és ennek idősorát mutatom be a 4. diagramon.

Az útszakasz egy kötött talajon lévő pályaszerkezet, amelyen közepesen nehéz forgalom halad át, a mérések időintervallumán belül semmilyen fenntartási beavatkozás a szakaszon nem volt. Mindezek figyelembevételével a látható kép meglehetősen érdekes, hiszen a nyolc év alatt a merevség csökkenése lenne a várható a leromlás miatt.

Kézenfekvő, hogy a merevség változását a földműmerevség változása okozza, ez viszont nyilvánvalóan függ annak nedvességtartalmától, ez pedig összefüggésben kell legyen a mérést megelőző csapadékmennyiséggel.

Megvizsgálva a méréseket megelőző időszak helyi csapadékviszonyait, a következő képet kapjuk.



5. ábra: Pályaszerkezet merevség változása

A kapcsolat viszonylag jól érzékelhető, de a számszerűsítéshez további elemzésre van szükség.

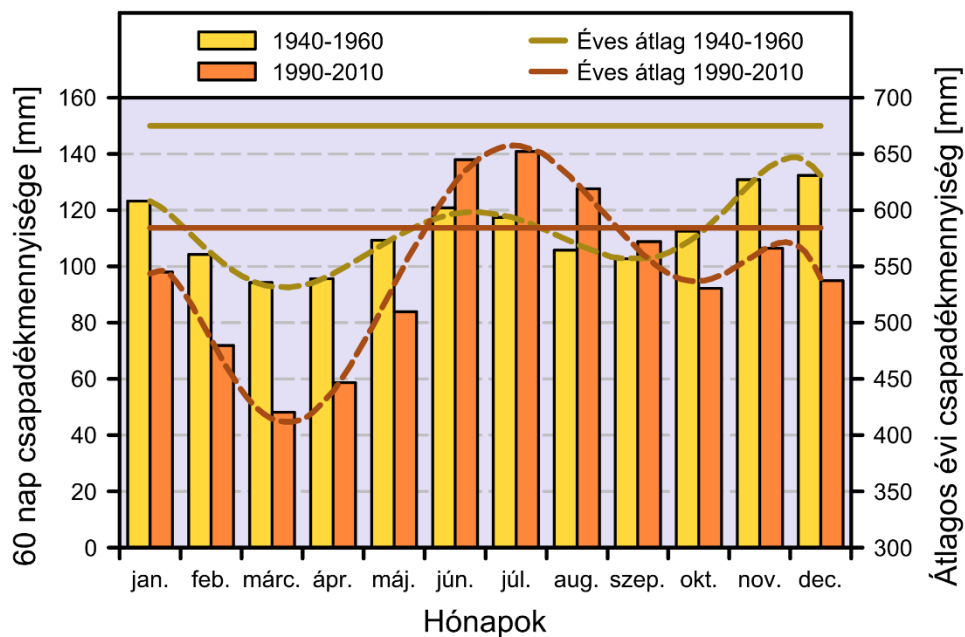
### 3.2. A FÖLDMŰ MEREVSÉGE ÉS NEDVESSÉGTARTALMA

A földmű merevségét nyilvánvalóan nagymértékben befolyásolja az aktuális nedvességtartalma.

Ezt már nagyon korán felismerték és Boromisza (2) már 1959-ben közzétette tapasztalatait a behajlások évszakonkénti (havi) változásairól, ennek eredményei ma is a megerősítés előtti behajlásértékek korrigálására szolgálnak.

Számos más ország is hasonló megoldást alkalmazott szabályozásaiban, azaz bizonyos, alapvetően az időjárás ciklikusságán alapuló korrekciókat alkalmaztak.

Az eljárásokat minden hasznosságuk ellenére felül kell vizsgálni, ugyanis nagyon érzékenyek azokra a változásokra, amelyek az érvényességi feltételrendszerükben bekövetkeznek.



6. ábra: Csapadékmennyiségek idősora

A diagramon két, egyenként 20 éves periódus átlagos csapadékmennyiségeit és a hó végén megállapítható 60 napos csapadékmennyiséget ábrázoltam.

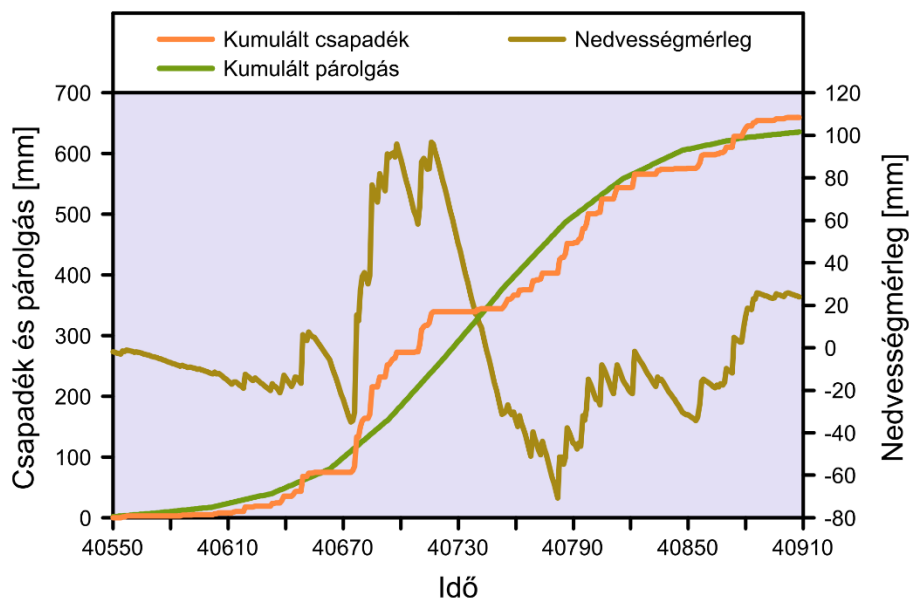
Ami a diagramon látszik – vegyük figyelembe azt is, hogy a két periódust 30 év választja el – minden bizonnyal a változékonyabbá váló klímának tulajdoníthatjuk.

Különösen feltűnő, hogy a március végén értelmezhető 60 napos csapadékösszeg a legkisebb az év során, továbbá a legnagyobb csapadékösszegek egyértelműen a nyári időszakokra tolódtak el. Tehát azok az empiriák, amelyeket a korábbi periódus csapadék és hőmérsékletviszonyai között állapítottak meg, ma már nem érvényesek.

Vizsgáljuk meg, hogy a meteorológiai és tágabb érvennyel környezeti befolyások hogyan hatnak a földmű nedvességtartalmára, ezt Van Gurp (3) alapján teszem meg.

Az egységnyi talajfelületre lehulló csapadék sorsa alapvetően kétféle lehet, a terepalaktól és a vízelvezetéstől, valamint a talajfajától (telítettségtől) és a terep fedettségétől függően távozik a felületről, a nem távozó rész a talajba szivárog.

A beszivárgott vízmennyiség a párolgás illetve a növények által végrehajtott párologtatás hatására távozik, e két utóbbit együttesen evapotranspirációnak (ET) hívjuk. Az ET értéke egyrészt függ az aktuális sugárzástól (hőmérséklettől) másrészt a növényzet aktuális vegetációs periódusától függ.



7. ábra: Talaj nedvességmérlegének alakulása

A folyamat egy éves alakulását, valós csapadék és becsült párolgásadatok alapján a 7. diagramon ábrázoltam.

A kumulált csapadékösszeg egy adottság (az elmúlt néhány évben hazánkban szélsőséges különbségek alakultak ki), a párolgás nagymértékben hőmérsékletfüggő (a növények vegetációs periódusai is ezt követik), a kettő különbsége a nedvességmérleg.

Mindezek alapján megállapítható, hogy a nedvességmérleg – és általa befolyásoltan a földmű nedvességtartalma, ezáltal merevsége – nagyon összetett folyamatok eredménye.

Ahhoz, hogy ezeket a folyamatokat számszerűsíthető módon is megismerjük, célzott vizsgálatsorozatokra van szükség.

A 2.1 alpontban ismertetett esetekben nemcsak az FWD készülékkel mért behajlások, hanem azok pontos időpontja is ismert, továbbá viszonylag hosszú idősor áll rendelkezésünkre.

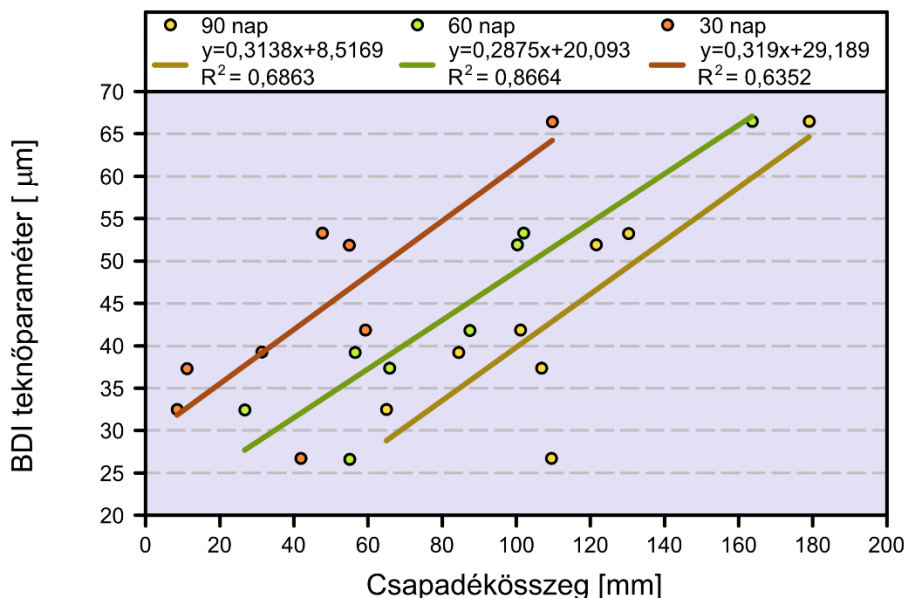
A mérési időpontok alapján meghatározott földmű merevség indikátorokat és a különböző, a mérést megelőző időszak csapadékösszegeit kapcsolatba hozva a következő diagramon látható képet kapjuk.

(Az érdeklődők számára megjegyzem, hogy nagyon sok hazai meteorológiai állomás adatai elérhetők a National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA – honlapján.) Jól megfigyelhető, hogy

mindegyik csapadékösszeg esetében létezik kapcsolat, de ez legerősebben a 60 napos csapadékösszeg esetében mutatkozik meg.

Itt lényegében arról van szó, hogy az azonos útszakasz a terepalakulásból származó beszivárgó csapadékmennyiség közel azonosságát jelenti, következésképpen a nedvességmérleg viszonylag hasonló lehet a különböző mérési időpontokban és ez közel azonos földműmrevséget jelent.

Tehát abban a szerencsés esetben, amikor viszonylag hosszú idősor áll rendelkezésünkre, meglepően jó regresszió képezhető a behajlási és a meteorológiai adatokból.



8. ábra: Teknőparaméter függése a mérést megelőző időszak csapadékösszegétől

Kézenfekvő, hogy az országos közúthálózaton a rendszeres állapotfelmérési behajlásméréseket (a korábbiakat és az újakat) valamint az UTMET állomások csapadékadatait erre a célra felhasználják, ezáltal az úthálózat jelentős részén előállíthatók az előző diagramnak megfelelő „kalibrációs” regressziós vonalak.

### 3.3. A FÖLDMŰMEREVSÉG VÁLTOZÁSÁNAK HATÁSA AZ ÚTPÁLYASZERKEZET TEHERBÍRÓ KÉPESSÉGÉRE

Az eddigiek alapján látható, hogy a földműmrevség meglehetősen nagy mértékben változik. Célszerű azt is megvizsgálni, hogy ennek a változásnak mi a hatása az útpályaszerkezet teherbíró képességére.

Az útpályaszerkezet fáradási szempontból értelmezhető teherbíró képességét – hátralévő élettartamát – hazai állapotfelmérési gyakorlatunk a behajlások alapján határozza meg, ami tömören azt jelenti, hogy minél nagyobb a behajlás (minél kisebb az egyenértékű felületi modulus) annál kisebb a hátralévő élettartam.

Mivel az aktuális behajlás (egyenértékű felületi modulus), mint már láttuk, jelentős mértékben változik, a tényleges hátralévő élettartam meghatározásánál ezt figyelembe kell venni.

A különböző nagyságú (vagy különböző feltételek mellett ható) igénybevételek összesített károsító hatásának számítására a Palmgren–Miner-összefüggés használata általános.

Az összefüggés a következők szerint írható le:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_i}{N_i} + \dots + \frac{n_n}{N_n} = x \tag{5}$$

ahol:

$n_1$  - az adott terhelési szinthez (aktuális földműmrevséghez) tartozó tényleges teher-ismétlésszám



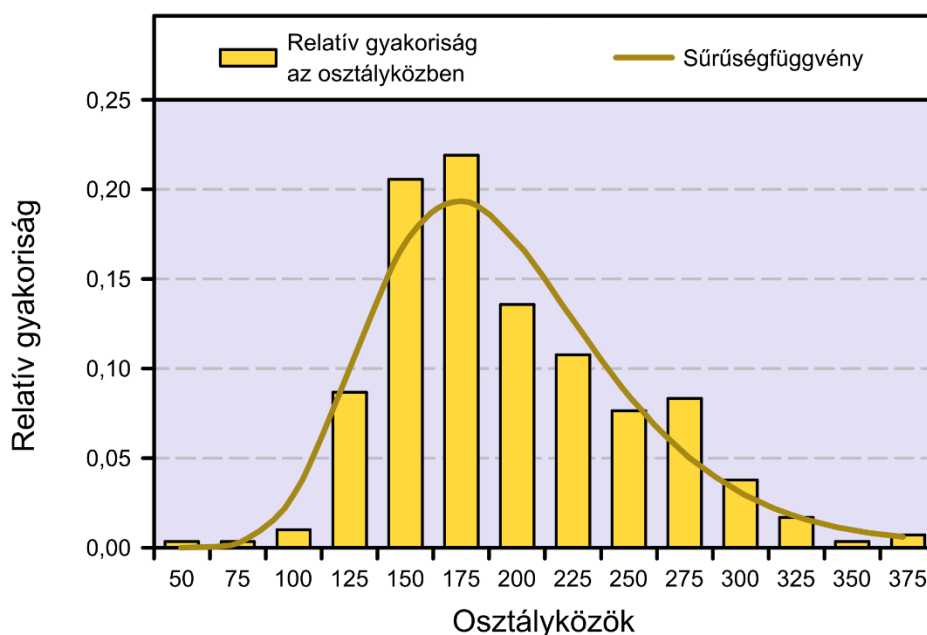
$N_1$  - az adott terhelési szinthez (aktuális földműmerektséghez) tartozó, tönkremenetelt okozó teher ismétlésszám

$x$  - a tényleges tönkremenetel valószínűsége (amennyiben ez egyenlő, vagy nagyobb, mint 1, a tönkremenetel bekövetkezett)

A pályaszerkezet méretezésére vonatkozó érvényes szabályozásunk szerint a földmű várható legkedvezőtlenebb (pl. tavaszi) teherbírási modulusát kell a méretezés során figyelembe venni. Ez lényegében azt jelenti, hogy a teljes élettartam alatt ez a modulus érvényes. A szabályozásnak ez az eleme más országok szabályozásában is fellelhető, de jellemzően szerepel egy legkedvezőbb érték is, és a kettő közötti eloszlás paraméterei is.

Vizsgáljuk meg most a fent ismertetett összefüggés segítségével, ahogy ez az előírás milyen méretű biztonságot tartalmaz.

Mindenek előtt megszerkesztettem a földműmerektség relatív gyakoriságfüggvényét.



9. ábra: Földműmerektség histogramja és sűrűségfüggvénye

Az adott útszakaszon a ténylegesen előfordult minimális földműmerektség érték 50 MPa, azaz az új pályaszerkezetek esetében előírt 40 MPa értéket kellően megközelítjük.

Itt meg kell jegyezni, hogy a behajlasmérésekből a Boussinesque-összefüggésekkel számolt földműmerektség értékei a behajlasmérő eszköz (FWD) rövid idejű terhelésénél érvényes „dinamikus” merevségértékek, tehát nem vehetők össze a tárcsás mérésből nyerhető E2 értékekkel.

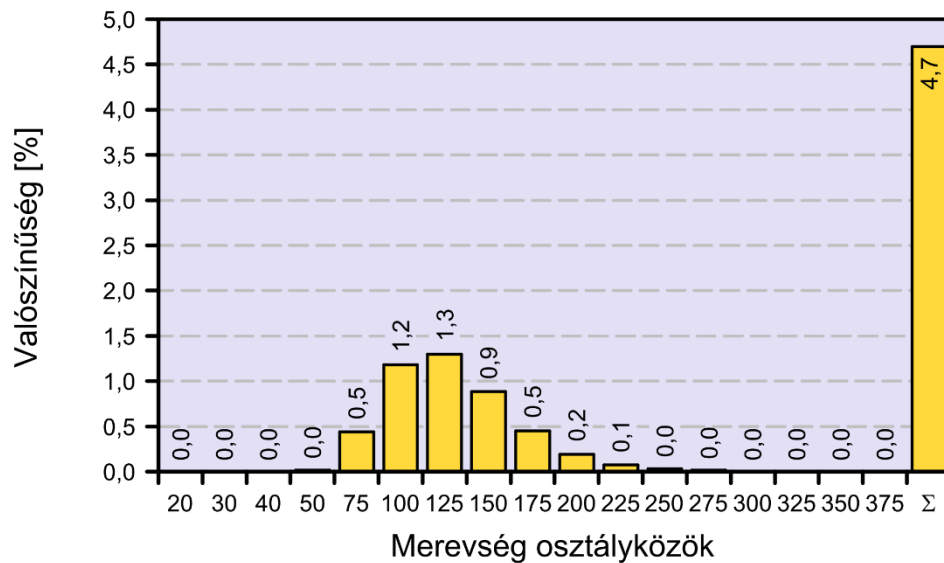
Az is megjegyzendő, hogy az érvényes méretezési utasításunk (ÚT 2-1.202) típus pályaszerkezeteinek számításos méretezésénél minden esetben a „legkedvezőtlenebb”, de „dinamikus” földműmerektség lett figyelembe véve.

Az egyes osztályközökben való előfordulás valószínűségét megszorozzuk egy tervezett nehéz forgalmi számmal, kapjuk az összefüggés szerinti „ $n_i$ ” értékeket, az egyes osztályközök földműmerektségéből számítható az egyenértékű felületi modulus, ebből pedig becsülhetők az „ $N_i$ ” értékek.

A vizsgálat eredményeit a következő diagramon lehet megtekinteni.

Feltűnő, hogy a károsodások összege mindössze 4,7%, ez lényegében azt jelenti, hogy a feltételezések szerinti 40 MPa állandó földműmerektséghez képest több mint 20-szoros a várható élettartam.

Nyilvánvaló, hogy minden méretezéshez szükséges bizonyos biztonság alkalmazása, de ez az adott esetben valószínűleg szükségtelenül nagy.



10. ábra: Halmazott károk osztályközönként és összesen

Miután az úthálózatra fordítható összegek nyilvánvalóan korlátosak, szükségesnek látom a gyakorlatban kissé megkövesedett biztonsági tényezők felülvizsgálatát, mert mint látható, megfelelő modellekkel, számítással is alátámasztható módon ezeket reális értékre lehet meghatározni, ezzel az építés-fenntartás számára többletforrásokat lehet realizálni.

### 3.4. A VÁLTOZÉKONYABB KLÍMA HATÁSAI

Vizsgáljuk meg ismét a 6. diagramot, amely két hosszabb távú idősort mutat a csapadékadatokról.

Mindenekelőtt megállapítható, hogy az utolsó húsz év összegzett csapadékmennyisége érdemben kisebb, mint az 1940–60 közötti időszaké.

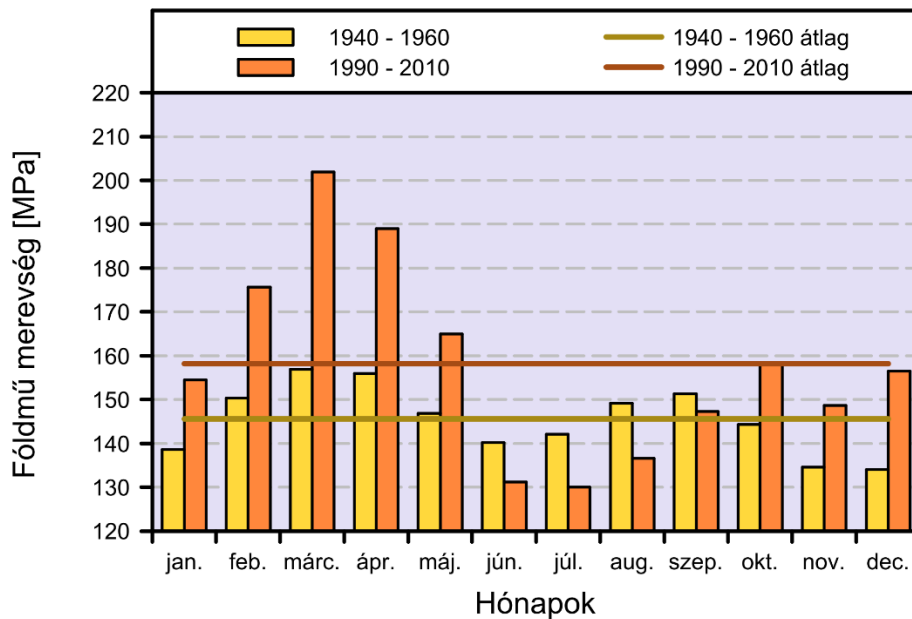
Ez elvileg akár kedvező is lehet, hiszen a csökkenő csapadékmennyiség a földmű merevségére kedvező hatást gyakorolhat.

A csapadékadatokból a 8. diagram szerinti regressziós lehetőség alapján a földműmerevség indikátort, majd ebből merevséget számoltam és ezt ábrázoltam a 11. diagramon, mindkét idősor esetében havonta és az időszakai átlagokat is.

A későbbi – szárazabb – periódusra vonatkozóan igazolódott a kedvezőbb szituáció, ugyanakkor, az időbeli eltolódásnak lehetnek kedvezőtlenebb hatásai is.

Útpályaszerkezeti aszfaltrétegeink merevsége hőmérsékletük függvénye és abban az esetben, ha a magasabb hőmérsékletű nyári periódusok összeesnek az alacsonyabb földmű teherbírás-értékekkel, akkor a teljes pályaszerkezet merevsége csökkenhet, ezáltal a halmazott károsodások megnőhetnek.

Ez ugyanakkor már sokkal összetettebb kérdés, mert az aszfaltkeverékek magasabb hőmérsékleten jobb fáradási tulajdonságokat mutatnak, azaz a tényleges hatás mindig csak egyedileg határozható meg.



11. ábra: Földmű merevségek időszora

Ez azonban nem azt jelenti, hogy ne használjuk ki a számítási módszereket, amelyekre példát mutat Pethő (4) munkája is.

Nem tartozik szorosan ide, de itt kívánom megjegyezni, hogy semmiképpen nem értek egyet azokkal a vélekedésekkel, amelyek a „globális felmelegedés” miatt az aszfaltok bekövetkező súlyos deformációs problémáit vizionálják.

Aszfaltjaink a globális sugárzástól hevülnek fel, ennek mennyisége a mi szélességünkön csillagászati okok miatt állandó, a földfelszínre érkező mennyiséget a borultság lényegében a csapadékkal arányosan befolyásolja, de az aszfaltok energiaelnyelő képessége (albedója) eleve nagymértékben korlátozza az elérhető maximális hőmérsékletet, tehát ezzel a vélt problémával nem kell megküzdenünk.

#### 4. A MEREVSÉG MÉRÉSE

A valós szerkezet viselkedésének megismeréséhez szükség van mérésekre, de szükséges a mérések mögötti fizikai tartalom ismerete is, hogy az eredményeket megfelelően tudjuk interpretálni.

A kreatív építőmérnökök számos eljárást dolgoztak ki, ezeket a következőkben röviden áttekintjük.

##### 4.1. STATIKUS MÉRÉSEK

Kezdetben valamilyen ellensúly segítségével adtak terhelést a mérendő felületre, ezek közül a mai napig használjuk a tárcsás mérést, illetve a behajlásmérést (5).

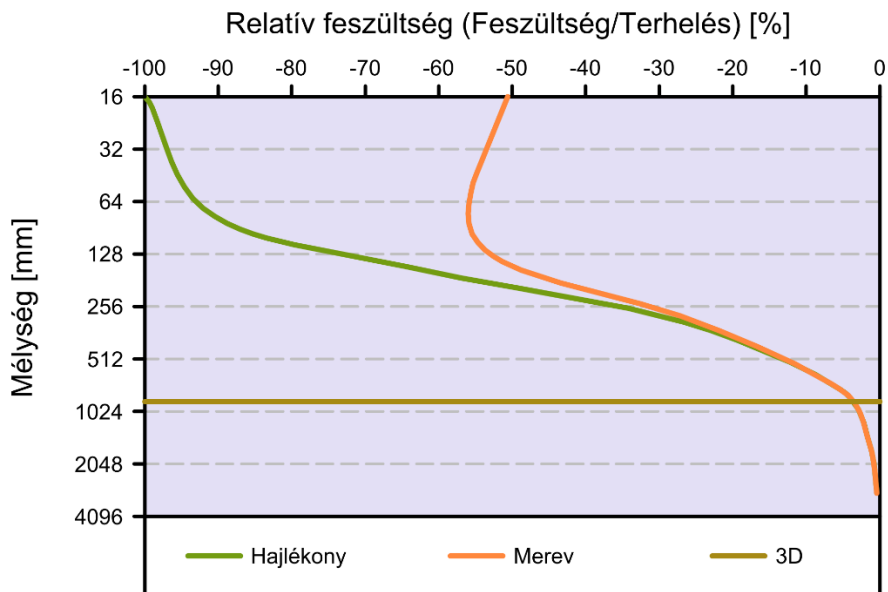
A tárcsás mérés esetén a teherbíró képesség mérőszámát a vizsgálat eredményéből Boussinesque-képletével kiszámolva MPa (N/mm<sup>2</sup>) dimenzióban adjuk meg, a behajlásmérésnél a teherbíró képességet a behajlás nagyságával jellemezzük, mindkét esetben a terhelés tengelyében mérjük az alakváltozásokat.

Mindkét mérés esetében az eredmények értékelésénél két tényezőt kell figyelembe venni.

- **Hatásmélység**

A szilárdságtanban jól ismert Saint Venant-elv (F. Van Cauwelaert (6)) alkalmazásával kijelölhető egy ún. „hatásmélység”, ami alatt a rendszer merevségi tulajdonságai már minimális hatást gyakorolnak a felszínen mért behajlás nagyságára.

A 12. diagramon a már ismertetett Boussinesque-képletek alapján végzett számítás eredménye jól mutatja, hogy a feszültségek a mélységgel rohamosan csökkennek és kb. a terhelő tárcsa átmérőjének háromszorosánál gyakorlatilag alig mutathatók ki.



12. ábra: Feszültségek megoszló tárcsaterhelés esetén, tárcsaátmérő 300 mm

Ezt mind tényleges vizsgálatokkal (Tompai (7)), mind véges elemes számításokkal (Szepesházi (8)) igazolták.

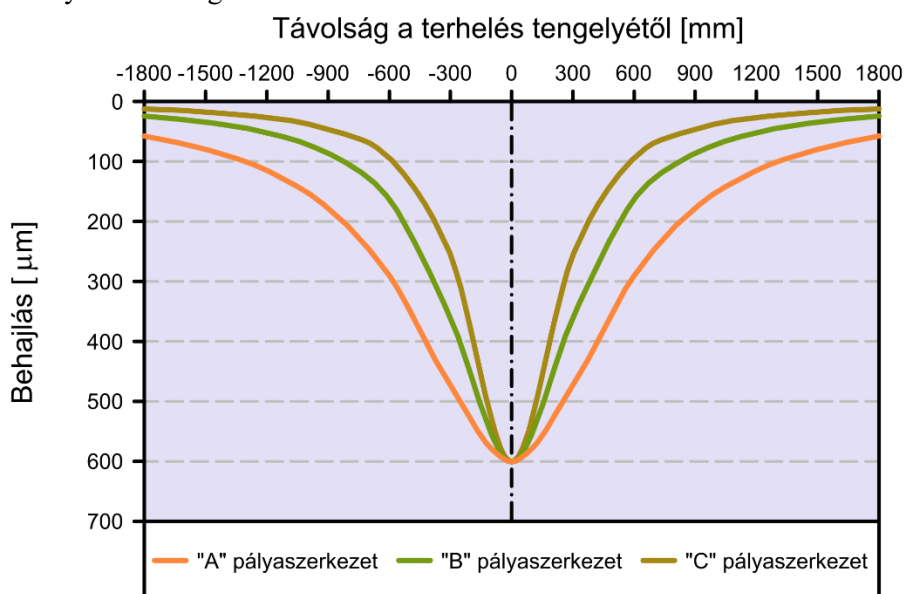
Hangsúlyozni kell, hogy itt elsősorban a mérések eredményéről van szó, a tényleges szilárdságtani viselkedésben – az ismétlődő terhelések hatására – az alacsony feszültségek mellett is létrejöhetnek térfogatváltozások, amik a teherbíró képességet befolyásolják.

Mindenesetre, főleg meglévő rendszerek vizsgálatánál a statikus mérések ezen korlátait figyelembe kell venni.

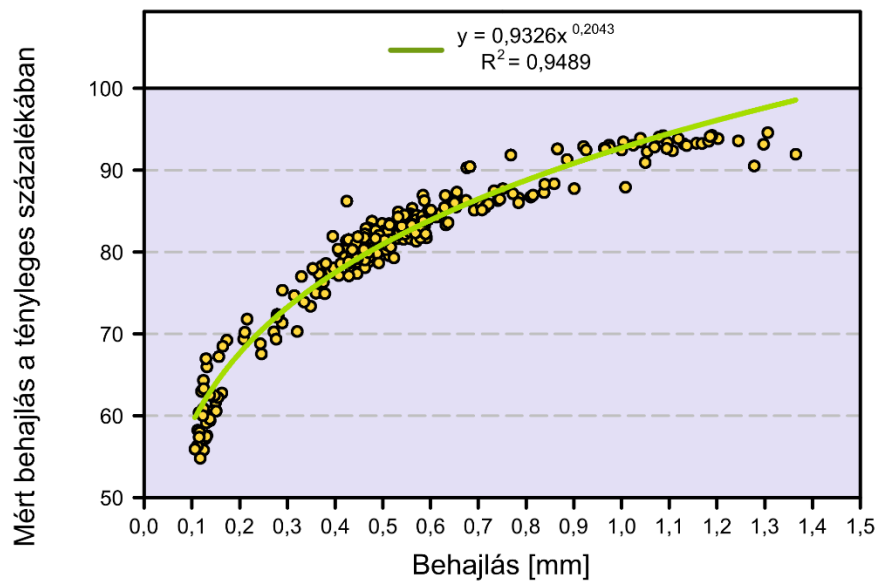
- **A behajlási teknő mérete**

A különböző merevségű rendszerek behajlási teknői különböznek egymástól, ennek megfelelően a viszonyítási síkot biztosító behajlásmérő alátámasztási pontja, amennyiben nem kellően nagy a karhossz, a behajlási teknőbe beleeshet, lásd a 13. diagramot.

Ez mérési hibát okozhat, aminek nagyságára vonatkozóan számításokat végeztem, ennek eredményei a 14. diagramon láthatók.



13. ábra: Behajlási vonalak különböző merevségű útpályaszerkezetek esetén



14. ábra: Behajlásmérés hibája 1500 mm hosszú mérőkar esetén

Jól látható, hogy a hazánkban leggyakrabban alkalmazott 1500 mm-es karhossz esetén az elkövetett hiba az alacsony behajlások tartományában már nagyon jelentős lehet.

#### 4.2. DINAMIKUS MÉRÉSEK

Néhány évtizede, hogy a geofizika eszközei megjelentek a közlekedési pályák behajlásméréseinél is.

Az eljárás itt impulzuserjesztéssel kezdődik (ez a közlekedési pályák esetében szinte kizárólag ejtősúly), majd az impulzus hatására kialakuló „hullámfront” okozta elmozdulásokat, vagy gyorsulásokat mérve és megfelelően átalakítva kapjuk a behajlásokat.

A leggyakrabban használt készülékeknel a behajlást a terhelés tengelyében lehet meghatározni, de léteznek olyan eszközök is, amelyekkel a terhelés tengelyétől különböző távolságokra elhelyezett szenzorokkal a behajlási teknő alakja is felvehető.

Az eljárás előnyei a következők:

- egyrészt, mivel a hullámfront a terheléstől meglehetősen nagy távolságban is érzékelhető a korszerű szenzorokkal, a reciprocitás miatt az ezen távolságnak megfelelő mélységben észlelhető merevségek is meghatározhatók. (1)
- jelentős előny, hogy korlátozottan rugalmas anyagaink az impulzus terhelés lefutásának időtartományában „elég” rugalmas viselkedést mutatnak.
- fontos metrológiai előny, hogy a behajlások meghatározásának precizitása az alkalmazott érzékeny szenzorok miatt kb. egy nagyságrenddel jobb, mint a mechanikai alapú mérőeszközöké (indikátoróra)

Elterjedt vélekedés a dinamikus mérésekkel kapcsolatban, hogy a rövid terhelési idő miatt a telített-közel telített állapotokban téves eredményeket ad a konszolidáció létrejöttének korlátozottsága miatt. Ez a vélekedés téves, mert „...mivel a közeget kitöltő folyadékban nyírási alakváltozás nem jöhet létre, folyadékban transzverzális hullám sem létezik. Ez az oka annak, hogy csak a szilárd, a szemcsék érintkezési helyein fellépő hatékony feszültség van befolyással az S-hullám terjedésére, a semleges feszültség nincs” (Törös (9)).

#### 4.3. NEHÉZ EJTŐSÚLYOS BEHAJLÁSMÉRŐ

A nehéz ejtősúlyos behajlasmérő (FWD) kiépíttetésében és kiérleltetésében már nem hasonlítható hagyományos eszközeinkhez, a nagy teljesítmény, a behajlási teknő nagy pontosságú felvétele, az adatok könnyű kezelése stb. alapján megkerülhetetlen eszköz.

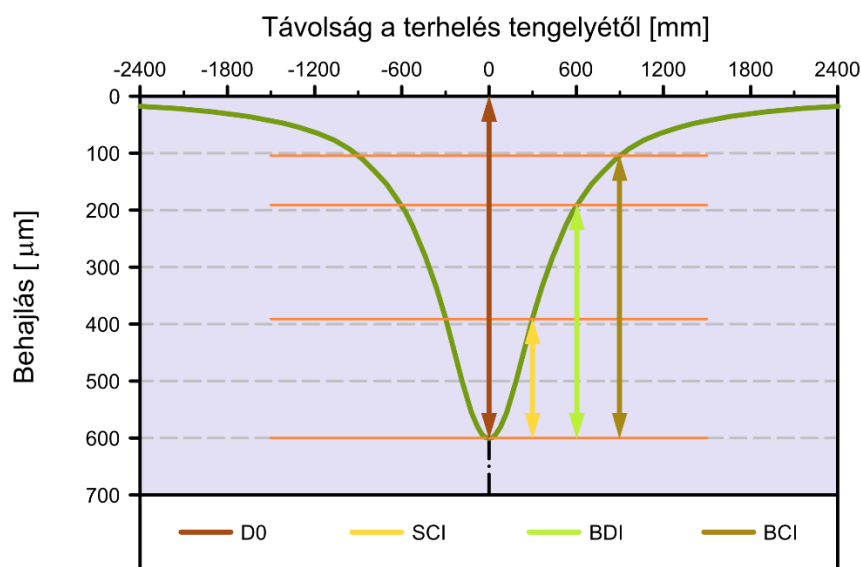
Mindenképpen el kell mondani, hogy a piacon lévő eszközök eredményei a gyakorlat számára azonosnak tekinthetők, azaz nincs értelme különbséget tenni.

Magyarországon már több mint 15 éve bevezetett módszer, kissé meglepő, hogy ugyanakkor viszonylag kevesen ismerik. Pedig a hazai publikációk száma sem kevés (érdeklődőknek javasolható a (10), (11), (12), (13), (14) alatti publikációk).

Különösen érdekesek azok a fejlesztések, amelyek a teljes pályaszerkezetet kötőanyagossal rétegekre és a földműre „szétbontva” lehetőséget adnak a földmű külön értékelésére is. (15), (16).

Napjainkban egyre inkább terjednek azok a kiértékelő eljárások, amelyek a behajlási teknő különböző pontjaihoz tartozó behajlások különbségével operálnak, az 1. diagramon is egy ilyen megoldást alkalmaztam.

A legfontosabb és éppen ezért önálló elnevezést is kapó teknőparaméterek a következő diagramon láthatók.



15. ábra: Behajlási teknő paraméterei

#### 4.4. SZIMULÁCIÓS LEHETŐSÉGEK

Új és meglévő útpályaszerkezetek esetében a hátralévő élettartam kérdése az egyik legfontosabb kérdés a közútkezelő számára.

Miután a hátralévő élettartamot meglehetősen sok külső és belső tényező befolyásolja, célszerű szimulációs módszereket alkalmazni.

A már hivatkozott szakirodalomban ilyen alkalmazott Pethő (4) is, továbbá egy korábbi fejlesztésnél alkalmazott eljárás (TLI (17)).

Nagyon érdekes Ullidzt (1) ismertetésében a MET (Method of Equivalent Thickness), amit Dániában rendszeresen alkalmaznak új pályaszerkezetek méretezésénél.

„A MET nem egy »fejlesztett modell«, hanem egy nagyon egyszerű módszer, amelyben a rétegezett szerkezetet az Odemark transzformáció segítségével fél-végtelen fél-térré alakítják át. Ezzel aztán a Boussinesque-egyenletek segítségével bármely ponton kiszámíthatók a feszültségek, alakváltozások és elmozdulások.”

A MET-nek – minden hasznossága mellett – megvannak a korlátai, egyrészt a fél-tér feltételezés szükségképpen hibákat okoz a viszonylag merevebb felépítmények esetén, másrészt nem veszi figyelembe a pályaszerkezet felső szálában keletkező húzó-igénybevételeket.

Három magyar mérnök (Primusz, Tóth, Markó (18), (19)) a behajlási teknő matematikai leírásával és több különböző felépítmény szimulációs számításával megoldotta ezt a problémát, ráadásul nagyon egyszerű igénybevételi számításokra is talált megoldást.

A publikációk alapján mind a meglévő, mind az új pályaszerkezetek esetére kialakítható olyan eljárás, ami a számos külső és belső tényező hatását képes figyelembe venni, természetesen a földmű állapotváltozásait is.

#### 4.5. STATIKUS ÉS DINAMIKUS MÉRÉSEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

Jelentős erőfeszítések történtek a különböző – egymás helyettesítésére alkalmas – statikus és dinamikus mérések közötti kapcsolat megállapítására.

Ezek során több „átszámító” képlet is született, amelyeket a gyakorlatban is alkalmaznak.

Mindenekelőtt le kell szögezni, hogy a két mérés – mértékegységben – azonos értékeket szolgáltat, fizikailag jelentősen különböző tartalommal bír, a talált kapcsolatok ennek megfelelően autokorrelációk.

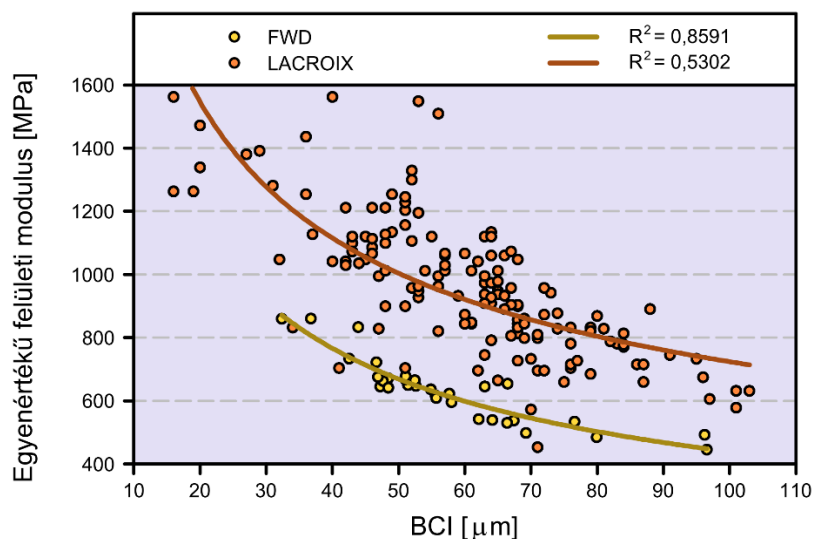
Azt is meg kell említeni, hogy a kapcsolatok keresése során a kísérletek metrológiailag gyakran kérdéses módon vannak megtervezve („összemérés”).

Tisztában kell lenni azzal, hogy a minimális metrológiai feltétel az egyszerű ismételtőség vizsgálatánál is az azonos minta, amit roncsolásos jellegű vizsgálat (pl. az E2 meghatározása az esetek nagy többségében) esetén lényegében nem lehet biztosítani, ilyenkor jelentősen nagyobb mintaszámmal mindenekelőtt a minták homogenitását kell vizsgálni.

Behajlásmérések esetén az azonos minta azonos mérési pontokat jelent, ismereteim szerint az átszámítási képletek megalkotásánál ezeket a feltételeket nem tartották be.

Ugyanakkor, egy azonos szakaszon, közel azonos időben történt Lacroix-, illetve FWD mérések eredményei nagyon érdekes tanulságokat mutatnak.

Miután a mérési pontok értelemszerűen különböztek, a feldolgozás során számítottam az egyenértékű felületi modulusokat mindkét adatsorból és ezeket kapcsolatba hoztam a mérési ponton értelmezhető BCI értékekkel.



16. ábra: Statikus és dinamikus mérések ugyanazon a szakaszon (1)

Mindenekelőtt látható, hogy a Lacroix-mérések eredményei jelentősen nagyobb merevségeket mutatnak, ami azért meglepő, mert az érvényes szabályozásunk statikus–dinamikus „átszámítási szorzója” ezzel éppen ellentétes összefüggést fejez ki.

Az FWD mérések eredményéből számolt regressziós vonal a Lacroix-méréssel lényegében párhuzamos tendenciát mutat.

Feltűnő a regressziós együtthatók nagy különbsége, aminek egyetlen magyarázata a mérések precizitása közötti különbség.

Ennek tükrében legalább is érdekes a Lacroix-mérésekkel kapcsolatos vélekedés, ami szerint a több (mintegy 4 méterenként történő mérés) adata javítja a megbízhatóságot.

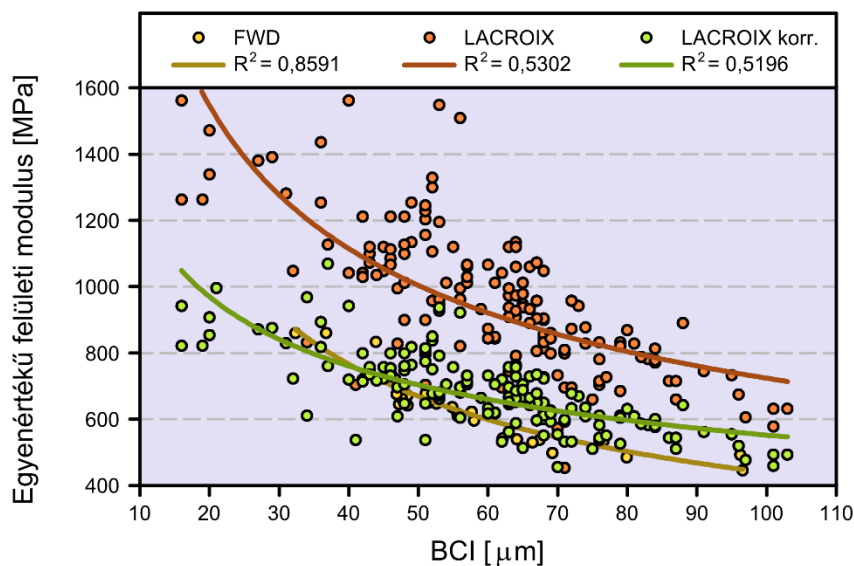
Az adott esetben ez a vélekedés nem tűnik megalapozottnak.

A behajlási teknő méretéből adódó szisztematikus hibalehetőségről már beszéltem, az ott leírtak alapján az 1300 mm-es Lacroix-karhossz figyelembevételével számítottam egy korrigált egyenértékű felületi modulus értéket.

Megjegyzendő, hogy a teknőparaméterek definíciószerűen süllyedés különbségeket, a BCI értékek nagyságát ennek megfelelően változtatlanul hagytam.

A korrigált Lacroix-kiértékelés meglepően jól egyezik az FWD eredményekkel, ebből az a következtetés vonható le, hogy a mérésnél alkalmazott karhossz okozta szisztematikus hiba az adott esetben lényegesen jelentősebb, mint a mérések reológiai különbözősége.

Az eredmények alapján javasolható egy általánosabb vizsgálat a különbségek értékelésére, vagy a statikus behajlásmérések erős korlátozása.



17. ábra: Statikus és dinamikus mérések ugyanazon a szakaszon (2)

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

Cikkemnek az volt a célja, hogy a talán legfontosabb szerkezetünknek, a földműnek a működés során bekövetkező változásai miatti hatások mértékére és jelentőségére a figyelmet felhívjam.

Kétségtelen az a nem jelentéktelen fejlődés, ami a földművek tervezésével kapcsolatban a legutóbbi évtizedekben végbement, bár azok a módszerek és eljárások, amik meghonosodtak, főleg a töltésalapozás, a konszolidáció és a stabilitási kérdések területén vannak.

A földmű egyszerű – mindennapi – teherviselése és annak hatása az útpályaszerkezetek tulajdonságaira kissé elhanyagolt terület, ugyanakkor vannak lehetőségeink ezen hatások számszerűsítésére.

A számszerűsítés már csak a nyilvánvalóan változékonyabbá váló klímánk miatt is szükséges, mert a korábbi tapasztalatok más klimatikus viszonyok között jöttek létre.

Ezen túlmenően is látható, hogy a pályaszerkezetek megtervezése és működtetése során még jelentős – gazdasági előnyé is válható – tartalékunk van.

A másik célom éppen a területen új kutatások lehetőségeinek felvázolása volt, hiszen egy viszonylag nagy projekten a minőségbiztosítással kapcsolatos nagyszámú mérés minimális kiegészítésével és hallgatók MSc, esetleg PhD szakedzők munkáival nagyon sok hasznos új ismeret szerezhető.

## 6. FELHASZNÁLT IRODALOM



- Per Ullidtz: Modelling Flexible Pavement Response and Performance. 1998.
- Dr. Boromisza Tibor, Útburkolatok behajlása Mélyépítéstudományi Szemle 1959. december
- Christ van Gorp, Characterization of seasonal influences on asphalt pavements with the use of falling weigh deflectometers PHD disszertáció, Delft 1995
- Pethő László, A hőmérséklet eloszlás alakulása az aszfalt burkolatú útpályaszerkezetekben és ennek hatása a pályaszerkezeti rétegek méretezésére, technológiai tervezésére PHD értekezés 2008
- MSZ 2509/3 – 89, MSZ 2509/4 – 89 szabványok
- F. Van Cauwelaert Pavement design and evaluation, The required mathematics and its applications Federation of the Belgian Cement Industry, 2003
- Földművek és kötőanyag nélküli alaprétegek teherbírásának és tömörségének ellenőrzése könnyű ejtősúlyos módszerekkel. Dr. Tompai Zoltán, PHD értekezés, 2008
- UNIVERSITAS-Győr Nonprofit Kft.: Védőrétegek teherviselésének modellezése, kutatási jelentés, Szepesházi Róbert és társai, 2010
- A szeizmikus módszer geotechnikai alkalmazásainak kritikai vizsgálata. Dr. Törös Endre, PHD értekezés 2006
- Bernd Grätz, Az ejtősúlyos deflektométerek lehetőségei és határai az útpályaszerkezetek értékelésénél Közúti és mélyépítési szemle, 1999/6
- dr. Adorjányi K., Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek megerősítésének méretezése ejtősúlyos behajlások alapján Közúti és mélyépítési szemle, 1999/12
- dr. Ambrus Kálmán: Ejtősúlyos teherbírás-méréseken alapuló új útburkolat-erősítési méretezési eljárás kidolgozása, Közúti és Mélyépítési Szemle, 2001/3
- Tóth Csaba : A teherbíró képesség meghatározásának ellentmondásai és lehetőségei Közúti és mélyépítéstudományi szemle 2007/8
- Tóth Csaba, Tóth József: Útpályaszerkezetek roncsolásmentes diagnosztikai lehetőségei, Közúti és Mélyépítési Szemle, 2008, 58. évfolyam, 5-6. szám
- S. Jendia: Bewertung der Tragfähigkeit von bituminösen Straßenbefestigungen. PhD disszertáció, Karlsruhe, 1995.
- Hothan, Jürgen; Schäfer, Florian: Analyse und Weiterentwicklung der Bewertung von Tragfähigkeitsmessungen, Straße + Autobahn 7/2004
- Nagy terhelésű utak pályaszerkezeteinek gazdaságos meghatározása TLI Zrt, kézirat 2006
- Primusz Péter – Tóth Csaba, A behajlási teknő geometriája Közlekedésépítési szemle 2009, december
- Primusz Péter – Markó Gergely Kétrétegű pályaszerkezet modellek paramétereinek meghatározása FWD mérések alapján, Közlekedésépítési szemle, 2010 július
- ÚT 2-1.202:2005 Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezése és megerősítése
- Guide for Mechanistic – Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures, Appendix CC1, Illinois 2001