Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar
Vásárhelyi Pál Építőmérnöki és Földtudományi Doktori Iskola

# HAJLÉKONY ÚTPÁLYASZERKEZETEK ALATTI SZEMCSÉS TALAJOK CIKLIKUS FORGALMI TERHELÉSBŐL SZÁRMAZÓ HALMOZÓDÓ MARADÓ ÖSSZENYOMÓDÁSÁNAK MEGHATÁROZÁSA

## Ph.D. értekezés tézisei

**Vámos Máté János**
okl. építőmérnök

Témavezető:

Dr. Szendefy János, Ph.D.

Egyetemi docens

Mannheim, 2024

TARTALOMJEGYZÉK

1 Bevezető ... 2
1.1 A téma aktualitása ... 2
1.2 A kutatás célkitűzése ... 3
2 Kutatás módszertana ... 4
2.1 HCA-modell bemutatása ... 4
2.2 Egyszerüsített számítási eljárás ... 5
2.3 Vizsgált pályaszerkezetek ... 6
2.4 Vizsgált talajok, paramétereik és anyagmodellek ... 6
2.5 Saját számítási eljárás kalibrálása és összehasonlítása más módszerekkel ... 7
3 Tézisek ... 7
4 Eredmények hasznosíthatósága és további kutatási lehetőségek ... 22
5 Publikációk jegyzéke ... 23
5.1 Az értekezés tézispontjaihoz kapcsolódó saját publikációk ... 23
5.1.1 Külföldön megjelent idegen nyelvű folyóiratcikk ... 23
5.1.2 Magyarországon megjelent idegen nyelvű folyóiratcikk ... 23
5.1.3 Magyarországon megjelent magyar nyelvű folyóiratcikk ... 23
5.2 Egyéb publikációk ... 23
5.2.1 Nemzetközi konferencia kiadványában megjelent idegen nyelvű publikáció ... 23
5.2.2 Magyarországon megjelent magyar nyelvű folyóiratcikk ... 23
5.2.3 Magyar nyelvű konferencia kiadványában, megjelent publikáció ... 23
5.2.4 Könyv, Konferenciakötet ... 24
5.2.5 Könyv (oktatási anyag) ... 24
6 Hivtkozások ... 24

# 1 BEVEZETŐ

A pályaszerkezetek méretezése során célunk olyan gazdaságos kombinációt találni a rétegek anyagára és vastagságára vonatkozóan, hogy a pályaszerkezet a használhatóságának korlátozása nélkül az élettartama alat a tervezési forgalmat elviselje. A pályaszerkezet tönkremenetele, vagy használhatóságának korlátozása bekövetkezhet a fáradási repedések vagy a túlzott mértékű nyomvályúképződés következtében. A nyomvályúk a forgalombiztonságra veszélyt jelentenek, mivel a nyomvályúban a csapadék felgyülemlik, illetve a gépjármű nehezebben kormányozható. A nemzetközi szakirodalomban a terhelésből kialakuló nyomvályúsodás (rutting) lehet aszfalt eredetű az elégtelen tömörítés vagy helytelen összetételű aszfaltkeverék miatt, illetve talaj eredetű, az ismétlődő terhelés következtében a talajban kialakuló halmozódó maradó alakváltozásokból. A hazai szakirodalom a nyomvályú alatt az aszfaltrétegekben kialakuló deformációkat érti, a talaj eredetű összenyomódásokat pályaszerkezeti süllyedésnek nevezi. Kutatásomban a talaj eredetű pályaszerkezeti deformációkkal, süllyedésekkel foglalkozom, az aszfaltrétegek nem kívánatos összenyomódása a számításokban nincs figyelembe véve.

## 1.1 A téma aktualitása

A geotechnikai szerkezetek esetében a használhatósági határállapot teljesítése sokszor nehezebb feladat, mint a teherbírási követelmények kielégítése. A megbízható, hatékony és gazdaságos üzemeltetéshez is szükséges a szerkezetek alakváltozásainak minél pontosabb becslése, az altalaj ismétlődő vagy dinamikus hatásokra adott válasza, és a befolyásoló tényezők minél pontosabb megismerése.

A közúti közlekedés gazdaságra és társadalomra gyakorlolt hatása vitathatatlan. Magyarországon 2023-ban az áruszállítás közel 70%-a, a települések közötti közösségi személyszállítás közel fele közúton bonyolódott (KSH,

2024). Ennek ellenére az autópályákat nem számítva az országos közúthálózat 44%-án továbbra is a burkolat állapota rossz minősítésű (5-ös besorolású) volt 2023-ban, és további 9% a nem megfelelő (4-es) kategóriába tartozott. Az egyenetlenség osztályzatok az utak hullámosságát, nyomvályússágát minősítik. Ebből a szempontból a közúthálózat valamelyest kedvezőbb képet mutat, mint a felületépség tekintetében. Összesen 15 ezer kilométer szakaszon, az autópályák nélkül számított országos hálózat felén jónak vagy megfelelőnek minősültek az utak, ugyanakkor 32%-uk (10 ezer kilométer) a rossz, illetve a nem megfelelő kategóriákba tartozott. A baleseti szempontból kiemelten veszélyes, 17 mm-es vagy annál mélyebb nyomvályús szakaszok hossza közel 1.200 kilométer volt 2023-ban, ez a Magyar Közút kezelésében lévő teljes hálózat 4%-a (Magyar Közút, 2024).

A hajlékony pályaszerkezetek alatti talajok összenyomódásának vizsgálata igen elhanyagolt terület, mivel az útpályaszerkezet-méretezés jelenlegi gyakorlata nem foglalkozik alaposan ezzel a kérdéssel. A hazai gyakorlatban az a hozzáállás uralkodik, hogy amennyiben a kivitelezés során betartják az előírt minőségi és építési követelményeket, a földmű függőleges összenyomódása az útpályaszerkezet élettartamának szempontjából várhatóan nem jelent majd kritikus igénybevételt. A vizsgált téma időszerűségét erősíti a folyamatban lévő globális éghajlatváltozás, amely kikényszeríti, hogy a korábban jól működő empirikus összefüggéseket olyan tudományosan megalapozott modellekkel váltsuk fel, amelyek segítenek megérteni a megváltozott peremfeltételek hatásait az épített környezetre.

Ha kitekintünk a nemzetközi útügyi műszaki előírásokra, akkor az egyik legmodernebbnek tartott RDO (RDO - Asphalt 09, 2009) is viszonylag egyszerűen kezeli a nyomvályúsodást. Amennyiben a földmű tetején betartjuk az előírt megengedett függőleges feszültséget, akkor nem kell nyomvályúsodásból fakadó számottevő károsodással számolnunk. A nyomvályú mélységét ugyanakkor nem számszerüsíti, az élettartam alatti leromlást nem tudjuk meghatározni (Zeißler, 2021). A belga CRR kutatóintézet (Verstraeten et al., 1982) a német előíráshoz hasonlóan a földmű tetején fellépő alakváltozás korlátozásával vizsgálja a nyomvályúsodásra való hajlandóságot, de nagyságát szintén nem adja meg. A hazai kutatók (Tóth and Primusz, 2020) által kifejlesztett mechanikus-empirikus méretezési eljárás is a CRR intézet képletét alkalmazza a nyomvályusodás vizsgálatára. Az ausztrál előírás (Austroads, 2019) a túlzott nyomvályú képződés nélküli megengedett egységtengely (8 t) áthaladást adja meg, amely a tervezési segédlet szerint az ausztrál környezeti viszonyokra a gyakorlatban jól bizonyított.

A szakirodalom továbbá nem egységes a nyomvályúk eredetével kapcsolatban sem. Egy nemrégiben készült szakirodalmi áttekintés szerint (Albayati, 2023)) a nyomvályúk kizárólag az aszfaltban keletkeznek, az alatta fevő szemcsés rétegek nem járulnak hozzá a maradó alakváltozásokhoz. Ennek megfelelően számos, a közelmúltban végzett kutatás az aszfalt reológiai tulajdonságiat igyekszik leírni (Gajári, 2019; Gajári et al., 2021), illetve az aszfaltkeverék nyomvályúsodással szembeni ellenállását igyekszik előtérbe helyezni (Aljbouri and Albayati, 2023; Bharath et al., 2023; Toth et al., 2024; Zhang et al., 2023). Ezzel szemben az AASHTO általi helyszíni vizsgálatok kimutatták, hogy a maradó alakváltozások 68%-a nem az aszfaltban, hanem az alatta lévő alap- és javítórétegben, valamint az altalajban keletkezik (Morris, 1973). Egy frisebb tanulmányban (White et al., 2002) hasonló eredményeket publikáltak. Ezek alapján a pályaszerkezetek nyomvályusodásának vizsgálatakor a kutatásoknak és a számítási módszernek az aszfalt helyett inkább a talajokra kellene koncentrálnia.

## 1.2 A kutatás célkitűzése

Egy a közelmúltban megjelent irodalmi áttekintés szerint (Singh and Sahoo, 2021) jelenleg nincs olyan a általánosan elismert és széles körben ismert, validált és praktikus számítási eljárás, amely az útpályaszerkezetek alatti talajok hosszú távú viselkedését ciklikus terhelés esetén megfelelően leírja. Bizonyos módszerek (Werkmeister, 2003) kizárólag az alap- és javítórétegre fókuszálnak, így az aljatalj hatása nincs figyelembe véve. Más vizsgáltok (Uzan, 2004) igen ígéretesnek tűnnek, de az anyagállandók kalibrálása nincs leírva, így eltérő peremfeltételek mellett nem hasznosíthatóak. Bizonyos kutatások (Qi et al., 2022; Zhou et al., 2022) a pályaszerkezetek alatti talajok maradó alakváltozásait kúszás jellegű anyagmodellel és 3D-s végeselemes vizsgálat segítségével határozzák meg, ugyanakkor az anyagmodellt csupán 1.000 ismétlésszámú ciklikus triaxiális vizsgálattal kalibrálták. Ennek megfelelően az anyagmodell hitelessége megkérdőjeleződik a pályaszerkezetek esetén, ahol sokszor több (tíz-) milliós tengelyáthaladást szükséges vizsgálni.

Doktori kutatásom célkitűzései a következők voltak:

- Egy olyan univerzális, eltérő peremfeltételek mellett is működő számítási módszert létrehozni, amely segítségével a hajlékony pályaszerkezetek alatti szemcsés talajok ismétlődő forgalmi terhelésből kialakuló halmozódó maradó alakváltozásait meg lehet határozni.

- Leírni a kialakuló alakváltozások és pályaszerkezeti süllyedések térbeli és időbeli lefutását.
- Megállapítani a talajban az építési előterheltség miatt uralkodó feszültségi és alakváltozási viszonyokat.
- Vizsgálni az eltérő szemcsés altalaj típusok és forgalmi terhelési osztályok hatását a kialakuló alakváltozásokra, süllyedésekre.
- Tisztázni, hogy az egyes szerkezeti rétegek (alap- és javítóréteg, altalaj) milyen arányban járulnak hozzá a teljes pályaszerkezeti süllyedéshez.
- Vizsgálni egyéb peremfeltételek változásának hatását a kilakuló süllyedésekre, mint a hőmérséklet, tengelyterhelés, javítóréteg vastagsága és anyaga.
- Összevetni a hazai típus-pályaszerkezetek várható pályaszerkezeti süllyedését más nemzetek hasonló empirikus alapú típus-pályaszerkezeteinek süllyedésével.

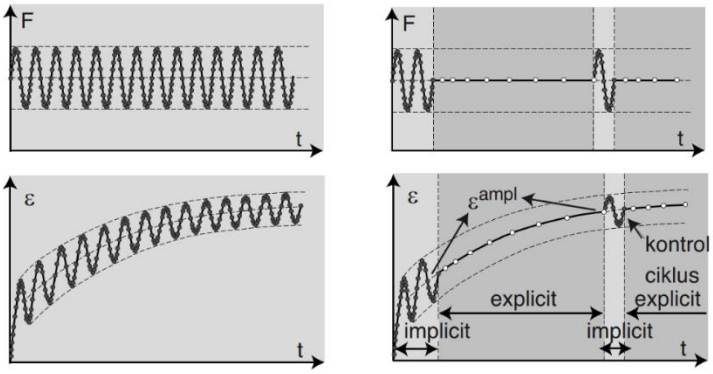
Mivel a probléma egy interdiszciplináris határterület az utas, a geotechnikus és mechanikai-anyagmodellezési szakágak között, célom, hogy értekezésemmel további diszkussziót indítsak a szakágak szakértői, kutatói között, hogy egymás munkáját jobban megérthessük.

# 2 KUTATÁS MÓDSZERTANA

## 2.1 HCA-modell bemutatása

A nagy ismétlésszámú ciklikus terhelés esetén az alakváltozásokat direkt kiszámító implicit módszerek nem célravezetőek, mivel minden egyes terhelési ciklussal halmozzuk és továbbvisszük az anyagmodell és a számítási (integrálási) hibákat, emiatt legfejlebb N< 50 ciklus esetén használható megbízhatóan (Niemunis, 2003). Emiatt az explicit megoldási módszerek kerülnek előtérbe, melyek empirikus alapon adják meg a ciklusszám – maradó alakváltozás ($\mathrm{N} - \varepsilon^{acc}$) összefüggést. Az egyik legjobban dokumentált, számos laborvizsgálattal igazolt ilyen típusú anyagmodell az ismétlődő terhelésből származó maradó alakváltozások meghatározására a High-Cycle Accumulation (HCA) modell, melyet (Niemunis et al., 2005) publikáltak és Wichtman doktori disszertációjának (Wichtmann, 2005) számos modellkísérletével verifikáltak. A modellt (Wichtmann, 2016) habilitációja részletesen bemutatja, itt csak az érthetőség kedvéért a legfontosabb számítási lépcsőket ismertetjük.

A HCA-modell alapgondolata, hogy kombinálja az implicit, növekményen ($\dot{\sigma} - \dot{\varepsilon}$) alapuló fejlett anyagmodelleket és az explicit, ciklusszám – maradó alakváltozás modelljét ($\mathrm{N} - \varepsilon^{acc}$). A tisztán implicit és a HCA-modell vegyes szemléletmódja közötti különbséget ábrázolja a 2.1 ábra.




2.1 ábra: a) a tisztán implicit és a HCA-modell vegyes szemléletmódja (Wichtmann, 2016)

Első lépésben egy hagyományos fejlett anyagmodell segítségével meghatározzuk az állapotjellemzőket, mint a hézagtényező, az átlagos normálfeszültség, a feszültségállapot és a ciklikus alakváltozási amplitúdó ($\varepsilon^{ampl}$). Ezek után az alakváltozási amplitúdó, mint bemenő adat segítségével meghatározzuk az explicit modellel a maradó alakváltozás növekményét (2.1). Drénezett esetben, amennyiben az átlagos feszültség nem változik, illetve ha nem lép föl statikus értelemben vett képlékeny alakváltozás, a (2.1) egyenlet direkt a képlékeny alakváltozásnövekményt adja meg.

$$\dot{\varepsilon}^{acc} = f_{ampl}\, \dot{f}_N\, f_e\, f_p\, f_Y \tag{2.1}$$

A képléleny alakváltozás növekményből a ΔN cikluscsomag hatására kialakuló maradó alakváltozást állandó $\varepsilon^{ampl}$ mellett a (2.2) egyenlet adja. Mivel hosszú távon a talajszerkezetben és állapotjellemzőiben változások állnak be, ezért időnként az explicit számítást megszakítjuk és az úgynevezett kontroll ciklusokban megismételjük az implicit analízist, hogy $\varepsilon^{ampl}$ aktuális értékével folytassunk további explicit számítást újabb ΔN cikluscsomagra.

$$\Delta\varepsilon^{acc} = \dot{\varepsilon}^{acc} \cdot \Delta\mathrm{N} \tag{2.2}$$

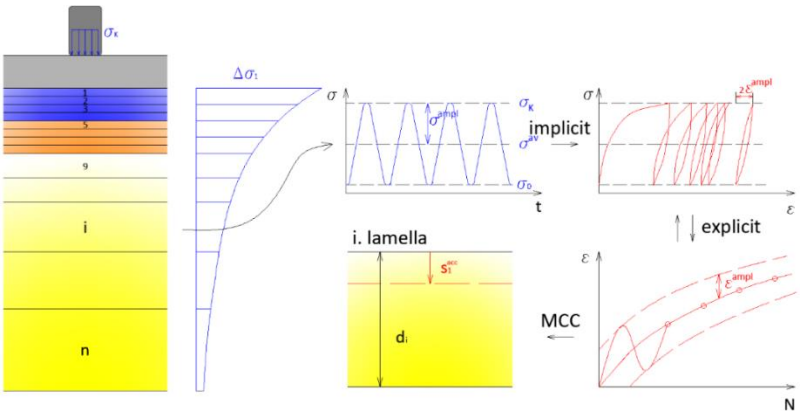
A HCA modell a halmozódó alakváltozást mint vektormennyiséget adja meg, így az alakváltozás skalár nagyságán kívül szükségünk van még egy folyási törvényre, amely megadja az akakváltozás irányát (**m**), vagyis hogy az alakváltozás milyen deviátoros $\varepsilon_q$ és térfogatos $\varepsilon_v$ részekből tevődik össze. Ezekből tudjuk majd származtatni a süllyedésszámításhoz szükséges függőleges alakváltozási komponenseket.

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{acc} = \dot{\varepsilon}^{acc}\boldsymbol{m} \tag{2.3}$$

Saját kutatásunkban az altalajra a MCC folyási törvényét alkalmaztuk (Wichtmann et al., 2014b) kutatási eredménye szerint. Zúzottkő alaprétegen végzett vizsgálatok (Wichtmann et al., 2010) kimutatták, hogy a homoktól eltérően a tömörítés hatására az anyag anizotrop módon viselkedik, így nem érvényes a MCC folyási törvénye. A zúzottkő alapréteg és a javítóréteg esetén az ott bemutatott anizotrop folyási törvényt alkalmaztuk. A halmozódó alakváltozásnövekmény vektor skalár részét leíró (2.1) egyenlet 5 empirikus tag $f_i$ szorzataként adódik. Az egyes $f_i$ tagok a főbb beolyásoló tényezőket írják le sorrendben a (rugalmas) alakváltozási amplitúdó $f_{ampl}$, a ciklusok száma, ill. a talaj emlékezete $\dot{f}_N$, a hézagtényező $f_e$, az átlagos normálfeszültség $f_p$ és a feszültségállapot $f_Y$. A fent említett 5 $f_i$ függvényt a 7 darab $C_i$ anyagállandóval írhatjuk le. Ezen felül szükségünk van még a folyási törvény és $f_Y$ leírásához a kritikus súrlódási szögre $\varphi_{cc}$, amely nem feltétlenük egyezik a monoton CU-triaxból számítható $\varphi_c$ kritikus súrlódási szöggel. A ciklikus folyási törvény kritikus súrlódási szögének $\varphi_{cc}$ meghatározására (Wichtmann et al., 2014)-ban lévő ajánlásokat alkalmaztuk.
A HCA paramétereket a (Wichtmann et al., 2015; Wichtmann and Triantafyllidis, 2015) cikkekben bemutatott egyszerüsített kalibrálási eljárás szerint határoztuk meg, amely tiszta, szubgranuláris szemcséjű kvarc homok-kavics talajokra vonatkozik, továbbá a korrelációkra érvényesek az következő korlátok: $1{,}5 < C_U < 8{,}0$ illetve, $0{,}1$ mm $< d_{50} <$ 3,5 mm, $N_{max} = 2\ 10^6$. Az alkalmazott 2 millió ciklus a laborban a műszaki megbízhatóság felső határának tekinthető. Az útpályaszerkezeteket azonban ennél nagyobb ismétlésszám is érheti. Mivel nem ismerjük a talaj viselkedését a $2\ 10^6$ ciklusszámnál nagyobb tartományban, így az erre vonatkozó megállapításokat megfelelő kritikával, óvintézkedéssel kell kezelni, hiszen nem tudhatjuk, hogy a $C_i$ paraméterek érvénnyessége az $N > 2\ 10^6$ tartományban továbbra is fennáll. A zúzottkő alapréteg és javítóréteg HCA paramétereit (Wichtmann et al., 2010) szerint választottuk meg.

## 2.2 Egyszerüsített számítási eljárás

Kutatásunkban egy lamellás számítási segítségével vizsgáltuk a pályaszerkezet süllyedéseit. Az egyszerüsítet számítási modell a konvencionális süllyedésszámításhoz használt lamellás módszerek analógiáján a talajt diszkretizálja, lamellákra bontja. Ezek után meghatározzuk a tengely- ill. kerékteherből származó feszültségeloszlást és megállapítjuk az egyes lamellákra jutó többlet függőleges feszültséget $\Delta\sigma_{1,i}$, majd ebből az átlagos normálfeszültség, tömörség és alakváltozás függő nemlineáris merevség segítségével kiszámítjuk a lamellák középvonalában (a lamella felső és alsó paramétereinek átlagaként) az alakváltozásokat $\varepsilon_i^{ampl}$. Ezt követően az $\varepsilon_i^{ampl}$ mint bemenő paraméter segítségvel meghatározzuk a halmózódó alakváltozásokat az egyes lamellákban $\varepsilon_i^{acc}$, majd a lamellák vastagságával és ciklikus folyási törvény segítségével kiszámítjuk a süllyedéseket lamellánként $s_{1,i}^{acc} = m_1 * \varepsilon_i^{acc\ i} * d_i$. A teljes süllyedés az egyes lamellák süllyedéseinek összegéből adódik $\Sigma s_{1,i}^{acc}$. A lamellás módszer számítási elvét a 2.2 ábra szemlélteti. Összehasonlító végeselemes vizsgálatok alapján az egyszerüsített számítási módszer kellően pontos és megbízható eredményt szolgáltat mind a rugalmas alakváltozások, mind a maradó alakváltozásokra vonatkozóan. Az élettartam végén várható maradó süllyedésekben az altalaj és a terhelés osztály függvényében legfeljebb 2-7%-os különbséget mutattam ki az egyszerüsített módszer és a végeselemes számítási módszer között.

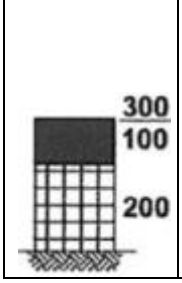
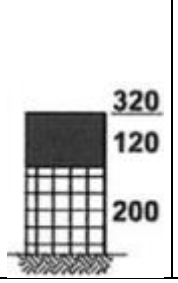
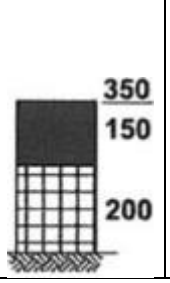
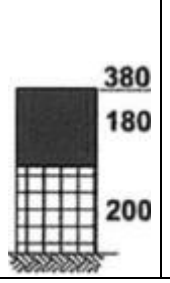
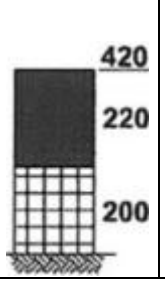
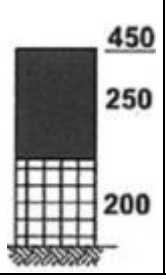
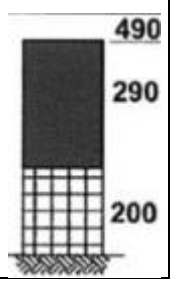



2.2 ábra: Lamellás számítási eljárás lépéseinek szemléltetése (Vámos and Szendefy, 2023a)

## 2.3 Vizsgált pályaszerkezetek

Kutatásunkban a 2.1. táblázatban látható a magyar útügyi műszaki előírás (e-UT 06.03.13:2005, n.d.) szerinti típus-pályaszerkezetek talaj eredetű, az ismétlődő egységtengely áthaladásából származó halmozódó maradó alakváltozását határoztuk meg. Ennek során az útszerkezetet 4 rétegű (homok és kavicsos homok altalaj, javítóréteg, FZKA és aszfaltburkolat) rendszerként modelleztük. A vizsgált altalajok kvarc homok, ill. kavicsos homok talajok, szubgranuláris szemcsealakkal, melyek szemeloszlási diagrammja a 2.3 ábrán látható. Vizsgálatainkban az altalajt $T_{rp}$=93%-os beépítési tömörségűnek feltételeztük. Az altalajra kerül a teherbírást biztosítandó egy 20 cm vastag javítóréteg. A javítóréteg esetén feltételeztük, hogy ezt $T_{rp}$=95%-os tömörségi fok mellett építjük be. Az FZKA HCA-paramétereire szakirodalmi adat csak a kolumbiai előírásoknak megfelelő zúzottkő alaprétegre érhető el, így ezt az anyagot választottuk vizsgálatainkban. Az FZKA-nál $T_{rp}$=96%-os beépítési tömörségi fokot feltételeztünk, vastagsága a 2.1. táblázat alapján egységesen 20 cm. A zúzottkő alaprétegre kerül a 2.1. táblázat szerinti, a terhelési osztálytól függő vastagságú aszfaltréteg. Saját számításainkban a táblázatban megadott tervezési forgalom tartományok középértékét vettük figyelembe.

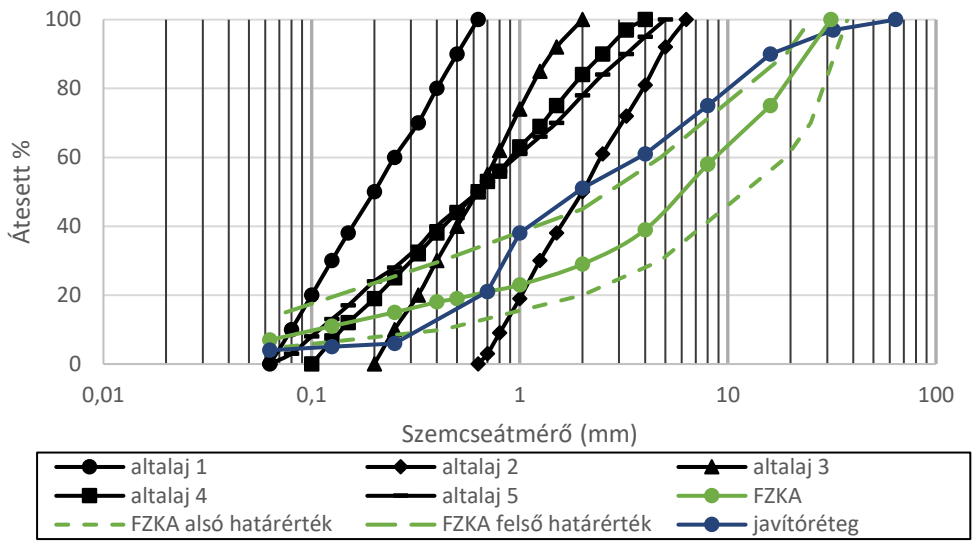
2.1. táblázat: Típus-pályaszerkezetek kötőanyag nélküli szemcsés alapréteggel

| Forgalmi terhelési osztály | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A | B | C | D | E | K | R |
| Tervezési forgalom, TF, millió egységtengely | | | | | | |
| 0,03-0,1 | 0,1-0,3 | 0,3-1 | 1-3 | 3-10 | 10-30 | 30 felett |
| Folytonos szemmegoszlású zúzottkő FZKA | | | | | | |
|  |  |  |  |  |  |  |

## 2.4 Vizsgált talajok, paramétereik és anyagmodellek

Az altalaj esetén a homok, illetve kavicsos homok talajokra esett a választásunk. Ennek oka, hogy leginkább ezekre a talajokra érhető el megbízható szakirodalmi adat a HCA-paraméterekre vonatkozóan. Kutatásunk során 5 különböző altalajtípust vizgáltunk, amelyek jól lefedik a (Wichtmann et al., 2015; Wichtmann and Triantafyllidis, 2015)-ban bemutatott egyszerüsített kalibrálási eljárással vizsgálható talajok spektrumát. A mértékadó szemcseátmérő hatását a „talaj 1”-„talaj 2”-„talaj 3” szemeloszlású talajokkal vizsgáltuk, ahol konstans egyenlőtlenségi mutató ($C_U$=3) mellett $d_{50}$ értékét változtattuk ($d_{50}$ sorrendben 0,2 mm; 0,6 mm és 2,0 mm). Az egyenlőtlenségi mutató hatását a „talaj 3”-„talaj 4”-„talaj 5” szemeloszlásokkal vizsgáltuk, ahol konstans $d_{50}$ = 0,6 mm mellett $C_U$ értéke 3,0-5,0-8,0 között változott. A vizsgált talajok szemeloszlási diagramját a 2.3 ábra mutatja.

Kutatásunkban az implicit számításoknál az altalajt nemlineárisan rugalmas, az átlagos normálfeszültség, a hézagtényező és a kis alakváltozásoktól függő merevséggel vettük figyelmbe. Az altalaj maximális nyírómerevségét $G_{max}$ és összenyomódási modulusát a (Wichtmann and Triantafyllidis, 2009) és (Wichtmann and Triantafyllidis, 2010)-ban ismertetett a $d_{50}$-től és $C_u$-tól függő korrelációk segítségével határoztuk meg. A leromlási görbe a (Wichtmann and Triantafyllidis, 2013)-ban ismertetett, a $C_U$-tól függő összefüggések segítségével állapítottuk meg. Mivel a merevség (G, E, M, υ) az átlagos normálfeszültségtől és az alakváltozástól is függ, ezért ezt minden lamellára, minden cikluscsomagban és minden egyes ciklus növekményi teherfelvitelekor meg kell határozni, hiszen folyamatosan változik. Ezen kívül minden egyes terhelési lépcső felvitelekor iterálással kell megállapítani a tényleges alakváltozás növekményt és az ehhez tartozó tényleges merevséget. A zúzottkő alapréteg és javítóréteg merevsége a reziliens modulussal az (AASHTO, 2002) 5-30. táblázata alapján lett figyelembe véve.




2.3 ábra: A vizsgált talajok szemeloszlási görbéi

2.2. táblázat: a vizsgált altalajok jellemző szemeloszlási és kezdeti tömörségi adatai

| Altalaj | $d_{50}$ (mm) | $C_u$ (-) | $e_{min}$ (-) | $e_{max}$ (-) | $\rho_d^{max}$ (g/cm³) | $e_0$ (-) | $\upsilon$ (-) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *talaj 1* | 0,2 | 3,0 | 0,540 | 0,920 | 1,75 | 0,627 | 0,33-0,36 |
| *talaj 2* | 2,0 | 3,0 | 0,491 | 0,783 | 1,81 | 0,577 | 0,33-0,36 |
| *talaj 3* | 0,6 | 3,0 | 0,474 | 0,829 | 1,83 | 0,559 | 0,33-0,36 |
| *talaj 4* | 0,6 | 5,0 | 0,394 | 0,749 | 1,93 | 0,478 | 0,35-0,38 |
| *talaj 5* | 0,6 | 8,0 | 0,356 | 0,673 | 1,98 | 0,439 | 0,36-0,40 |
| *javítóréteg* | 2,0 | 11,9 | 0,364 | 0,513 | 2,06 | 0,340 | 0,40 |
| *FZKA* | 6,3 | 100,0 | 0,230 | 0,440 | 2,30 | 0,188 | 0,40 |

### 2.5 Saját számítási eljárás kalibrálása és összehasonlítása más módszerekkel

Az első lépésben összehasonlító vizsgálatokat végeztem a Plaxis végeselemes szoftver segítségével annak érdekében, hogy a keresztirányú alakváltozások és vízszintes feszültségek eloszlására vonatkozólag bemenő adatokat kapjak, illetve a saját számítási eljárásból származó rugalmas alakváltozási amplitúdó eredmények megfelelőségét ellenőrizzem. Ezt követően a HS-Small anyagmodell $\gamma_{0,7}$ paraméterének hatásvizsgálata következett, majd a lamellás módszer felépítésére vonatkozó vizsgálatok. Végül a számítási eljárással meghatározott maradó süllyedések validálása kerül bemutatásra más módszerekkel összehasonlítva. Ennek során igazoltam, hogy az általam kidolgozott számítási eljárás mind a pillanatnyi rugalmas alakváltozásokra, mind a halmozódó maradó alakváltozásokra vonatkozóan jó egyezést mutat a végeselemes összehasonlító számításokkal. Az összehasonlító vizsgálatok során megállapítottam, hogy a hazai útügyi műszaki előírás típus-pályaszerkezeteinek földműve, különösen a magasabb terhelési osztályokban, nem felelnek meg a nemzetközi összehasonlításban. Ennek alapján várható, hogy különösen a magasabb terhelési osztályok esetén túlzott mértékű pályaszerkezeti süllyedések alakulnak ki. Összehasonlító süllyedésszámítással megállapítható, hogy a saját süllyedésszámítás eredményei az eltérő peremfeltételek ellenére jó egyezést mutatnak más módszerekel , a nagyságrendek közel megegyeznek, a görbék lefutásának jellege igen hasonló.

## 3 TÉZISEK

### 1. Tézicsoport

Kutatásomban egy egyszerűsített lamellás számítási eljárást fejlesztettem az excel programban, amely a hajlékony pályaszerkezetek alatti egyes talajrétegekben határozza meg implicit számítással a rugalmas elven számolt pillanatnyi alakváltozásokat $\varepsilon^{ampl}$, valamint HCA-modellel, explicit számítással a halmozódó maradó alakváltozásokat $\varepsilon^{acc}$ és a süllyedéseket $s^{acc}$ a ciklikusan fellépő forgalmi terhelésből. Annak érdekében, hogy saját számítási eljárásomba bemenő adatokat adjak a keresztirányú alakváltozások és vízszintes feszültségek eloszlására vonatkozólag, illetve a saját számítási eljárásomból származó alakváltozási amplitúdó eredmények megfelelősségét ellenőrizzem, összehasonlító vizsgálatokat végeztem a Plaxis végeselemes szoftver segítségével.

### 1.1. Tézis

Megállapítottam, hogy az építés alatt fellépő forgalmi és tömörítő terhek többszörösen túllépik az üzemi állapotban uralkodó terheket, így az útpályaszerkezetek alatti talajok túlkonszolidáltak, az OCR >> 1, ezért $K_{xy} \neq K_0^{NC}$. Végeselemes számítások alapján meghatároztam az „A”-„R” forgalmi terhelési osztályú hajlékony útpályaszerkezetek alatti zúzottkő alaprétegben, javítórétegben és altalajban uralkodó feszültségeket. **Ezek alapján meghatároztam a $K_{xy}$ földnyomási tényez térbeli eloszlását a mélység és a terhelés nagyságának függvényében, figyelembe véve az építési állapot miatti túlkonszolidáltságot. Ajánlásokat tettem, hogy a földnyomási tényező a zúzottkő alaprétegben a (3.1) függvény és 3.1. táblázat szerinti paraméterekkel írható le:**

$$K_{xy}^{FZKA}(z) = K_{xy,max}^{FZKA} - (z\frac{K_{xy,max}^{FZKA} - K_{xy,min}^{FZKA}}{d_{FZKA}}) \tag{3.1}$$

3.1. táblázat: A zúzottkő alaprétegre vonatkozó földnyomási tényezők a réteg tetején $K_{xy,max}^{FZKA}$ és alján $K_{xy,min}^{FZKA}$.

| Földnyomási tényező | A-R terhelési osztálytól függetlenül |
|---|---|
| $K_{xy,max}^{FZKA}$ | 0,85 |
| $K_{xy,min}^{FZKA}$ | 0,10 |

**Ajánlásokat tettem, hogy a földnyomási tényező a javítórétegben a 3.2 táblázat szerinti konstansokkal írható le:**

3.2. táblázat: A javítórétegre vonatkozó mélységtől független $K_{xy}^{jav}$ földnyomási tényezők a terhelési osztály és a teherfelvitel függvényében.

| terhelési osztály | Terhelési lépcső | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 t | 2 t | 4 t | 6 t | 8 t | 10 t |
| | $K_{xy}^{jav}$ | | | | | |
| A | 6,55 | 2,33 | 1,06 | 0,52 | 0,26 | 0,23 |
| B | 6,14 | 2,66 | 1,19 | 0,63 | 0,32 | 0,19 |
| C | 6,02 | 2,51 | 1,34 | 0,79 | 0,47 | 0,28 |
| D | 5,90 | 2,95 | 1,74 | 1,11 | 0,74 | 0,50 |
| E | 5,93 | 3,26 | 2,13 | 1,51 | 1,11 | 0,84 |
| K | 5,11 | 3,43 | 2,41 | 1,79 | 1,38 | 1,08 |
| R | 5,65 | 3,55 | 2,62 | 2,03 | 1,63 | 1,33 |

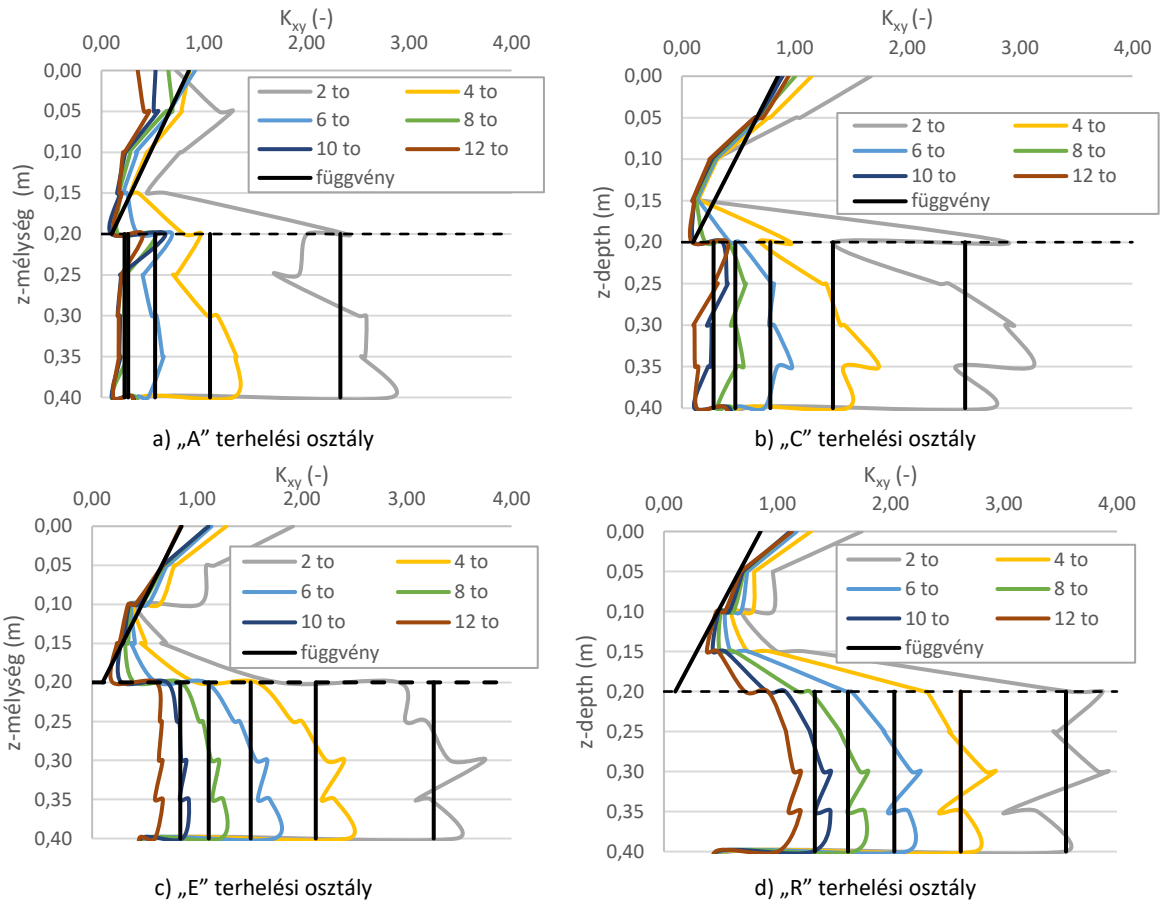
**Ajánlásokat tettem, hogy a földnyomási tényező az altalajban a (3.2) függvény és 3.3. táblázat szerinti paraméterekkel írható le:**

$$K_{xy}^{homok}(z) = \begin{cases} K_{xy,fent}^{homok} - \left[(z - d_{FZKA} - d_{jav})\frac{K_{xy,fent}^{homok} - K_{xy,max}^{homok}}{1{,}0}\right], & d_{FZKA} + d_{jav} \leq z \leq d_{FZKA} + d_{jav} + 1{,}0 \\ K_{xy,max}^{homok} - \left[(z - d_{FZKA} - d_{jav} - 1)\frac{K_{xy,max}^{homok} - K_{xy,lent}^{homok}}{d_{homok} - 1}\right], & d_{FZKA} + d_{jav} + 1 < z \end{cases} \tag{3.2}$$

3.3. táblázat: A homok altalajra alkalmazott földnyomási tényezők

| Földnyomási tényező | A-R terhelési osztálytól függetlenül |
|---|---|
| $K_{xy,fent}^{homok}$ | 0,55 |
| $K_{xy,max}^{homok}$ | 0,94 |
| $K_{xy,lent}^{homok}$ | 0,62 |

A zúzottkő alaprértegben és javítórétegben a végeselemes számítások szerinti $K_{xy}$ földnyomási tényezőket és ezek (3.1) egyenlet valamint 3.1. táblázat szerinti közelítéseit a 3.1 ábra szemlélteti.




a) „A” terhelési osztály

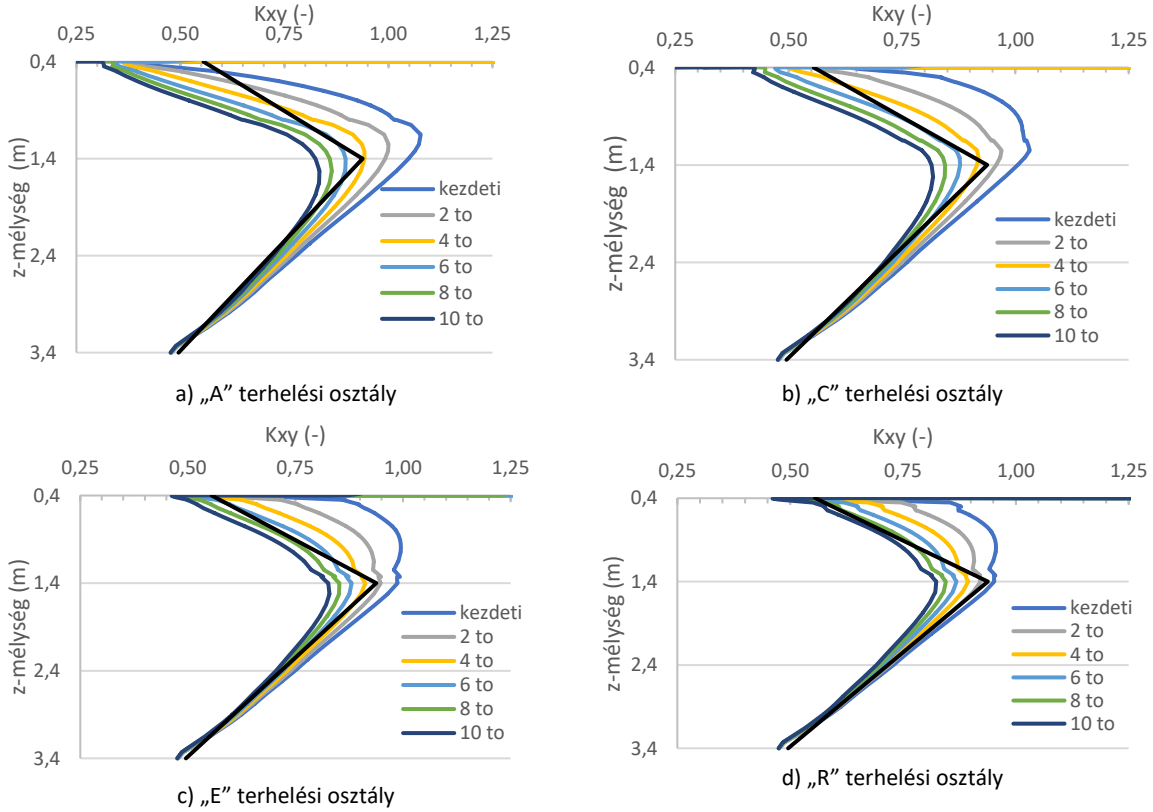
b) „C” terhelési osztály

c) „E” terhelési osztály

d) „R” terhelési osztály

3.1 ábra: A földnyomási tényezők értékei az FZKA és javítórétegben a végeselemes számítások és a saját számítási eljárás alapján

Az altalajban a végeselemes számítások szerinti $K_{xy}$ földnyomási tényezőket és ezek (3.2) egyenlet valamint 3.3. táblázat szerinti közelítéseit a 3.2 ábra szemlélteti.




a) „A” terhelési osztály

b) „C” terhelési osztály

c) „E” terhelési osztály

d) „R” terhelési osztály

3.2 ábra: A földnyomási tényezők értéke az altalajban a végeselemes modellből és a saját számítási eljárásban (fekete vonallal a saját függvény illesztés látszik)

### 1.2. Tézis

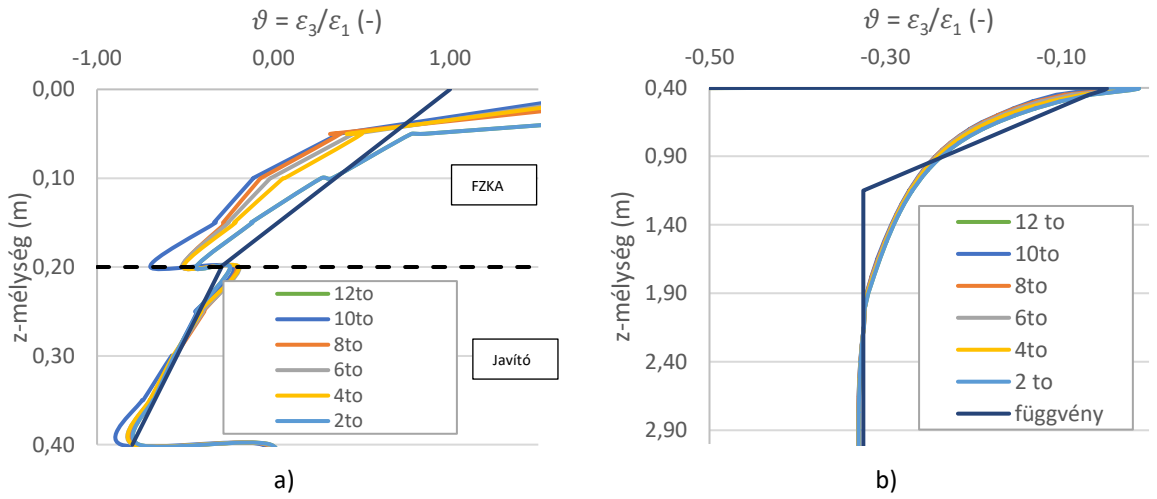
Végeselemes számítások alapján meghatároztam az „A“-„R“ forgalmi terhelési osztályú hajlékony pályaszerkezetek alatti zúzottkő alaprétegben, javítórétegben és altalajban uralkodó alakváltozási viszonyokat. **Ezek alapján meghatároztam a $\vartheta$ keresztirányú és függőleges alakváltozások arányát a mélység és a terhelés nagyságának függvényében. Végeselemes számításokkal igazoltam, hogy a szokványos alaptestekre jellemző lefutás csak az altalajra érvényes közelítőleg, a zúzottkő alaprétegben és a javítórétegben ettől jelentős eltérések vannak, amelyet a rétegek lemez szerű viselkedése magyaráz. Ajánlásokat tettem, hogy a $\vartheta$ tényező a (3.3) függvény és a 3.4. táblázat szerinti paraméterekkel írható le:**

$$\vartheta(z) = \begin{cases} \vartheta_{max,FZKA} + \left(z\dfrac{\vartheta_{max,FZKA} - \vartheta_{min,FZKA}}{d_{FZKA}}\right), & z \le d_{FZKA} \\ \vartheta_{max,jav} + \left((z - d_{FZKA})\dfrac{\vartheta_{max,jav} - \vartheta_{min,jav}}{d_{jav}}\right), & d_{FZKA} < z \le d_{jav} + d_{FZKA} \\ \vartheta_{max,homok} + \left((z - d_{FZKA} - d_{jav})\dfrac{\vartheta_{max,homok} - \vartheta_{min,homok}}{0{,}75}\right), & d_{FZKA} + d_{jav} < z \le 0{,}75 + d_{jav} + d_{FZKA} \\ \vartheta_{min,homok}, & z > 0{,}75 + d_{jav} + d_{FZKA} \end{cases} \tag{3.3}$$

3.4. táblázat: A $\vartheta$ paraméter szélsőértékei a saját számításokban

| Talaj | $\vartheta_{max}$ | $\vartheta_{min}$ |
|---|---|---|
| FZKA | 0,850 | -0,450 |
| Javító | -0,300 | -0,800 |
| Altalaj | -0,050 | -0,325 |

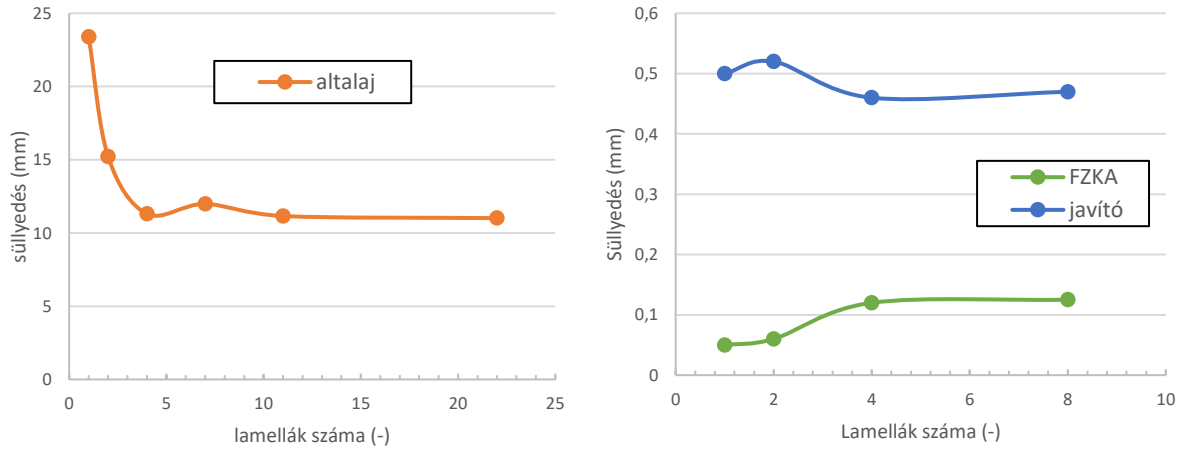
A végeselemes számítások szerinti $\vartheta$ alakváltozási arányokat, valamint ezek (3.3) függvény és 3.4. táblázat szerinti közelítéseit a 3.3. ábra szemlélteti.




3.3. ábra: a) a mért és az illesztett $\vartheta$ függvény a „C „terhelési osztályra. a) zúzottkő- és javítórétegben b) az altalajban

### 1.3. Tézis

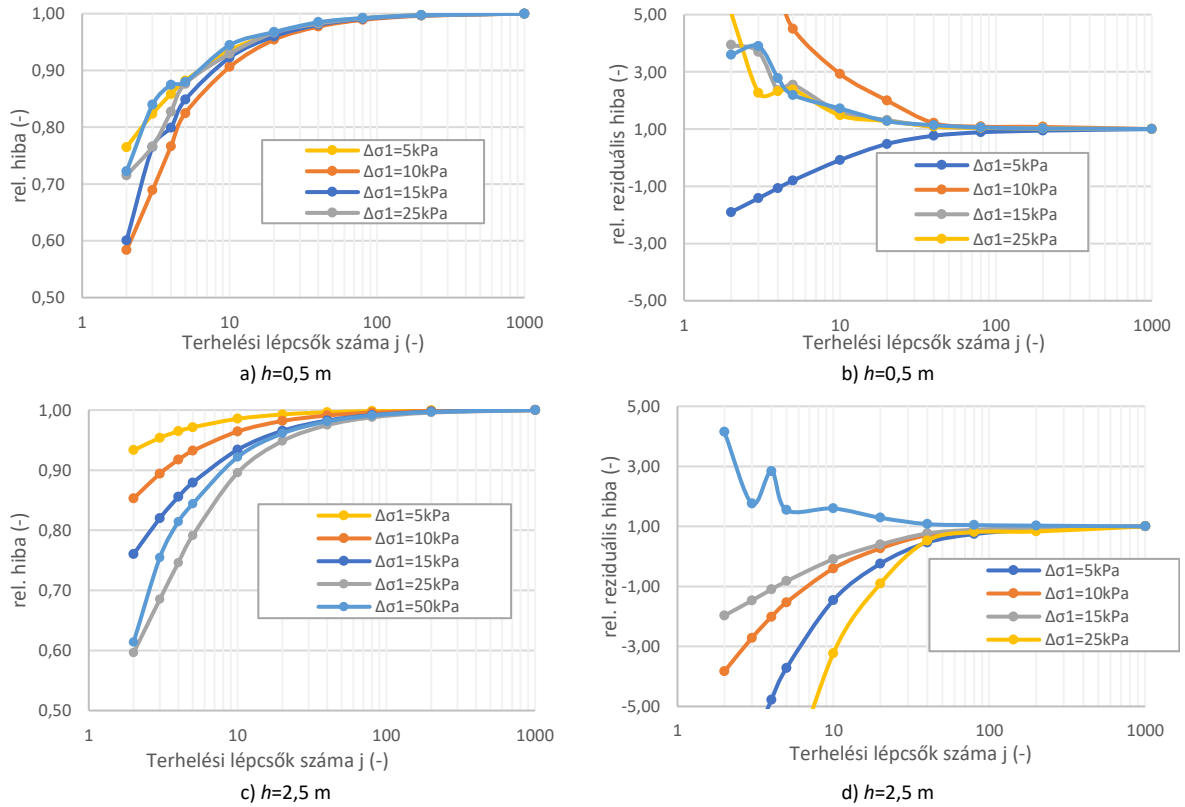
Vizsgálatokat folytattam a lamellák szükséges számáról és elrendezéséről. **A lamellák számát változtatva ajánlást tettem, hogy az FZKA-, javító és altalaj rétegek szükséges és elégséges lamellaszáma rendre 4-4-11. E fölötti sűrítés már nem vezet számottevő növekedéshez a pontosságban (3.4 ábra). Az altalaj esetén paramétervizsgálattal kimutattam, hogy változatlan lamellaszám mellett pontosabb eredményeket kapunk, ha a lamellákat az egyenletes kiosztás helyett a felső részeken besűrítjük, míg a mélyebben fekvő részeken vastagabbra választjuk.**




3.4 ábra: A kialakuló süllyedések a lamellák számának függvényében a) az altalajban b) FZKA és javítórétegben

### 1.4. Tézis

A pillanatnyi viselkedést a talajokban nemlineárisan rugalmas anyagmodell segítségével kell figyelembe venni. Az altalaj esetén figyelembe kell venni a tömörség, az átlagos normálfeszültség és a kis alakváltozások merevségre gyakorolt hatását, a zúzottkő alap- és javítóréteg esetén elegendő pusztán a nyomást figyelembe vevő *k-Θ* nemlineárisan rugalmas modell. **A teherfelviteli növekmények számának változtatásával megállapítottam, hogy a teherfelviteli lépcsők szükséges és elégséges száma *i*=40** (3.5 ábra)**.**

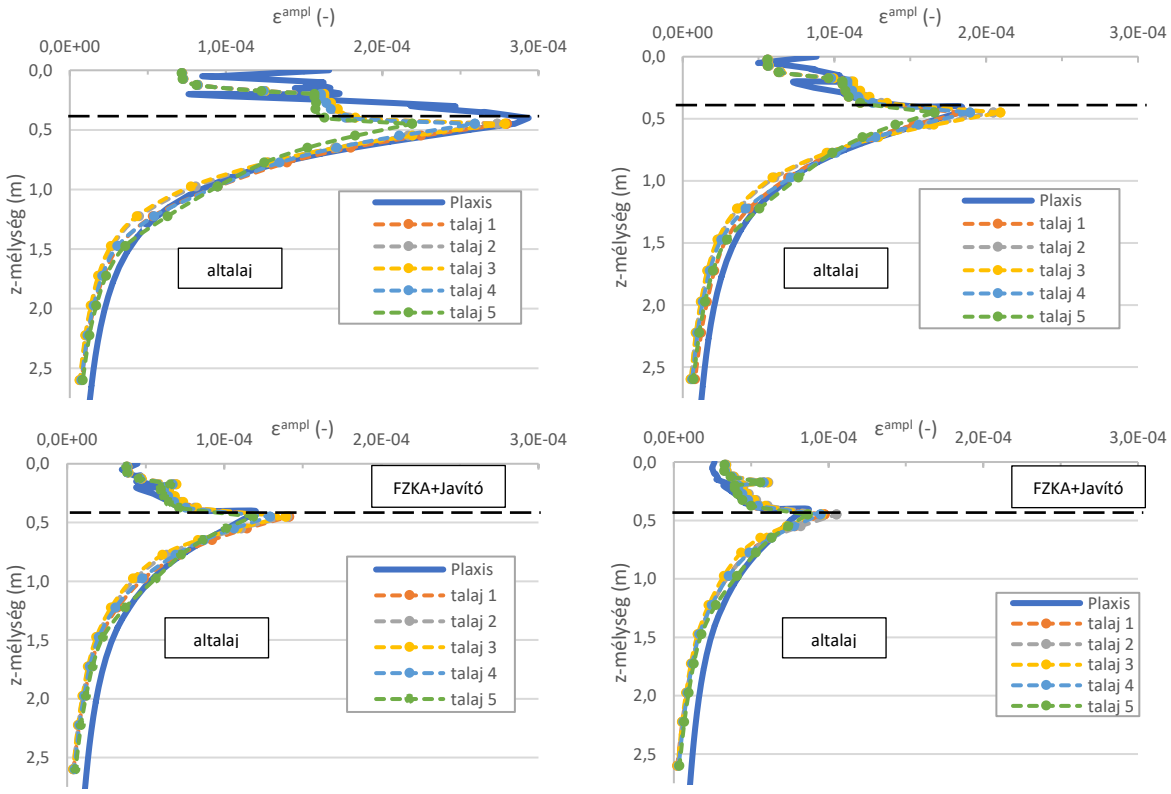



a) *h*=0,5 m b) *h*=0,5 m

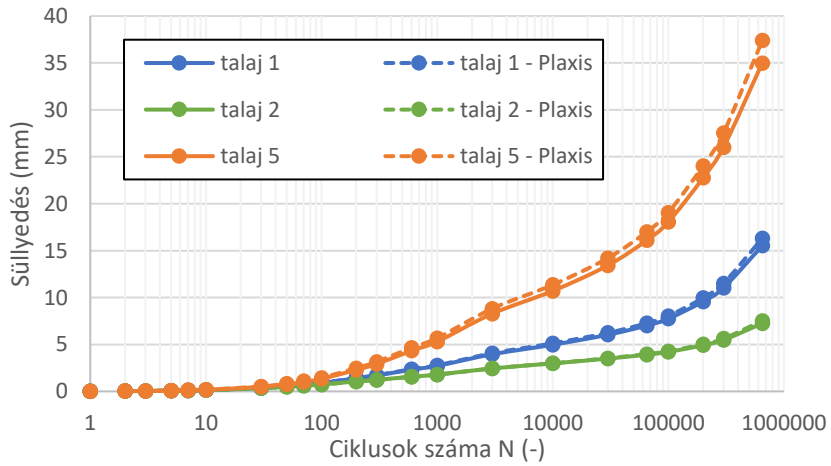
c) *h*=2,5 m d) *h*=2,5 m

3.5 ábra: A relatív hiba és relatív reziduális hiba a terhelési lépcsők számának függvényében

**Összehasonlító számításokkal igazoltam, hogy az általam kifejlesztett egyszerűsített lamellás számítási módszer, amely pusztán szakirodalmi bemenő adatokon alapszik ($d_{50}$, $C_U$, $k_1$, $k_2$), végeselemes számítás nélkül is kellő pontosságú bemenő adatokat ad az alakváltozási amplitúdóra $\varepsilon^{ampl}$ 3.6 ábra. A „C" terhelési osztályra végzett összehasonlító süllyedésszámítás szerint a maradó alakváltozások végértékében adódó különbség 3-7%-ot tesz ki annak függvényében, hogy a HCA-modell bemenő adatai a saját számítási eljárásból vagy a végeslemes számításból származnak 3.7 ábra.**




3.6 ábra: Az $\varepsilon^{ampl}$-$z$ összefüggés a) „A” osztály b) „C” osztály c) „E” osztály d) „R” osztály




3.7 ábra: A számított süllyedések a „C” terhelési osztály esetén a saját számítási eljárásból és a Plaxisból származó bemenő paraméterekkel

A téziscsoporthoz kapcsolódó publikációk: (Vámos and Szendefy, 2023a, 2023b)

## 2. Téziscsoport

A bemutatott saját lamellás számítási eljárás segítségével meghatároztam az e-UT 06.03.13 szerinti forgalmi terhelési osztályok keréktengelyben és az FZKA felszínén értelmezett, az élettartam alatt várható maradó pályaszerkezeti süllyedéseit az ismétlődő egységtengely áthaladásokból. Vizsgáltam 5 különböző altalajra a szemeloszlási paramétereknek ($C_U$ és $d_{50}$) a süllyedésekre gyakorolt hatását. Értékeltem és ábrázoltam az egyes talajrétegek (FZKA, javítóréteg, altalaj) százalékos hozzájárulási arányát a teljes süllyedésekhez.

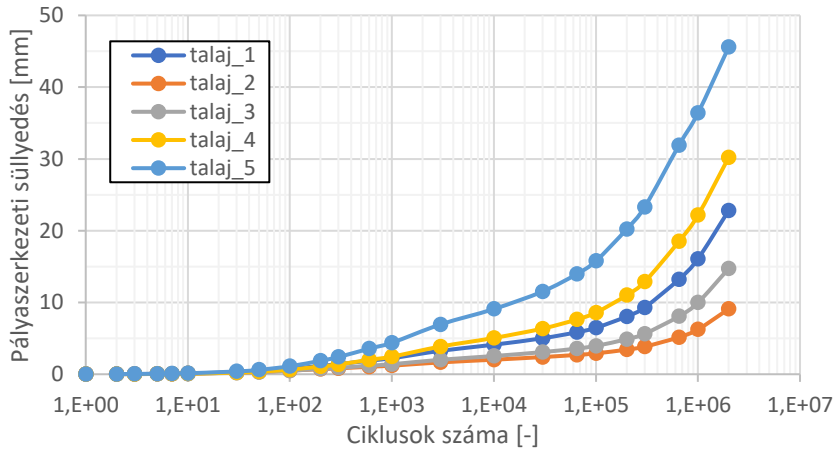
### 2.1. Tézis

**Kiszámítottam és diagrammon ábrázoltam 5 vizsgált altalajra minden forgalmi terhelési osztályban az FZKA felszínén értelmezett pályaszerkezeti süllyedéseket a ciklusok számának függvényében és így megadtam a várható süllyedések teljes spektrumát és időbeli lefolyását. Kimutattam, hogy az altalajnak döntő hatása van a süllyedésekre, az egyes altalajok közötti süllyedési arányokat a 3.5. táblázatban értékeltem:**

3.5. táblázat: A mértékadó szemeloszlású talajok hatása az FZKA felszínén értelmezett süllyedések végértékére és a süllyedési spektrumok

| Terhelési osztály | süllyedés végértéke (mm) | | | „talaj 5” / ”talaj 2” | „talaj 1” / ”talaj 2” |
|---|---|---|---|---|---|
| | „talaj 1” | „talaj 2” | „talaj 5” | | |
| A | 11,0 | 5,8 | 20,6 | 3,6 | 1,9 |
| B | 12,5 | 6,4 | 25,2 | 3,9 | 2,0 |
| C | 15,5 | 7,2 | 35,0 | 4,9 | 2,2 |
| D | 22,8 | 9,1 | 45,6 | 5,0 | 3,2 |
| E | 33,8 | 16,1 | 56,6 | 3,5 | 2,1 |
| K | 47,1 | 27,4 | 67,5 | 2,4 | 1,7 |
| R | 50,4 | 32,1 | 68,2 | 2,1 | 1,6 |

Az 5 különbösző altalajra meghatározott maradó süllyedéseket egy kiragadott példán a „D” terhelési osztályra a 3.8 ábra szemlélteti.

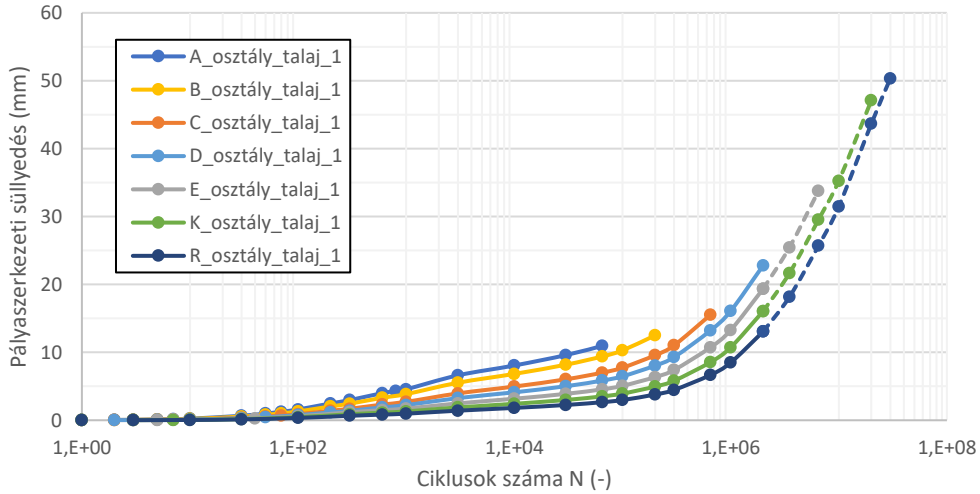



3.8 ábra: Az altalaj hatása az FZKA felszínén értelmezett pályaszerkezeti süllyedésekre „D” terhelési osztály esetén

**Számításokkal kimutattam, hogy változatlan $d_{50}$ mellett a növekvő $C_U$-val számottevően nőnek a halmozódó süllyedések. Megállapítottam továbbá, hogy változatlan $C_U$-mellett a növekvő $d_{50}$ kedvezően hat süllyedésekre.**

### 2.2. Tézis

Kiszámítottam és diagrammon ábrázoltam az egyes forgalmi terhelési osztályoknak az FZKA felszínén értelmezett pályaszerkezeti süllyedéseit a ciklusok számának függvényében az egyes altalajtípusokra. A meghatározott maradó süllyedéseket a ciklusok számán ak függvényében egy kiragadott példán a „talaj 1” altalajtípusra a 3.9 ábra szemlélteti.

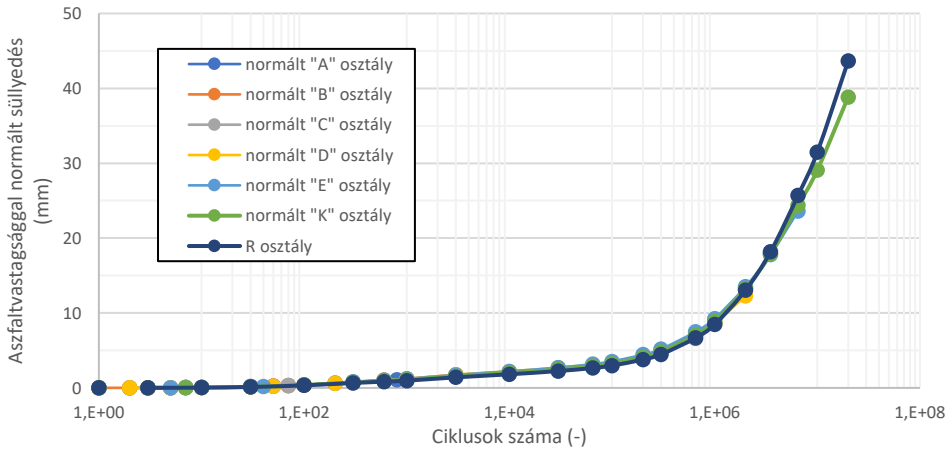



3.9 ábra: Az egyes terhelési osztályokban kialakuló az FZKA felszínén értelmezett pályaszerkezeti süllyedés-N összefüggés „talaj 1” altalaj esetén

**Megállapítottam, hogy az élettartam végén számított süllyedés a terhelési osztály növekedésével is nő. Kimutattam, hogy változatlan peremfeltételek (például altalaj típusa) és azonos ciklusszám mellett az egyes terhelési osztályok az aszfaltburkolatok vastagságának arányában a (3.4) összefüggés szerint szenvednek arányosan nagyobb süllyedéseket, hiszen a normált süllyedési görbék közel egybe esnek (3.10 ábra):**

$$s_{i,normált}(N) = s_i(N) / \left(\frac{d_{aszfalt,i}}{d_{aszfalt,R}}\right)^{1,3} \tag{3.4}$$

Ahol, $s_{i,normált}(N)$ az aszfaltvastagsággal normált süllyedés a ciklusok számának függvényében
$s_i(N)$ a pályaszerkezeti süllyedés a ciklusok számának függvényében
$d_{aszfalt,i}$ az aszfaltréteg vastagsága az adott terhelési osztályban
$d_{aszfalt,R}$ az aszfaltréteg vastagsága az R terhelési osztályban

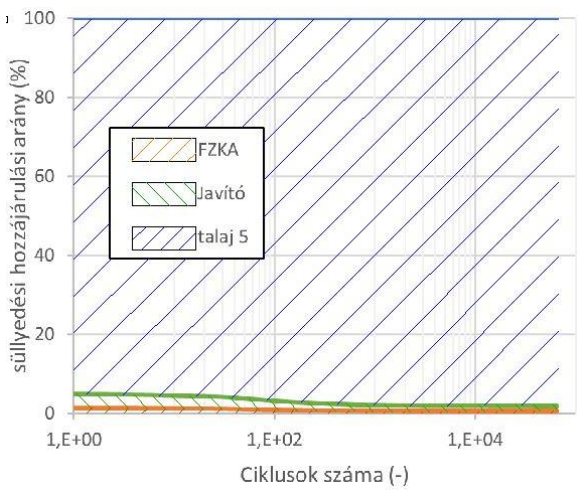



3.10 ábra: Az aszfaltburkolat vastagságával normált az FZKA felszínén értelmezett pályaszerkezeti süllyedések a ciklusok számával

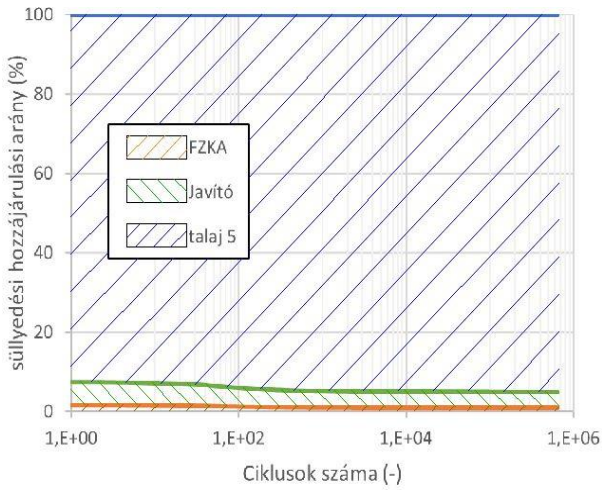
### 2.3. Tézis

**Kiszámítottam, diagrammon ábrázoltam és értékeltem az A-C-E-R forgalmi terhelési osztályokban és „talaj 1”-„talaj 2”-„talaj 5” altalajtípusok esetén az egyes rétegek százalékos hozzájárulási arányát a teljes süllyedésekhez. Kimutattam, hogy a süllyedések döntő hányada altalaj eredetű (75 % - 98%). Megállapítottam, hogy a terhelés végére az altalaj részaránya a teljes süllyedésekhez képest csökken, ill. a növekvő forgalmi terhelési osztállyal általánosságban csökken. Kimutattam, hogy a könnyebben tömöríthető jobban graduált talajok részesedése a süllyedésekhez magasabb, mint a meredek szemeloszlású talajoké.**

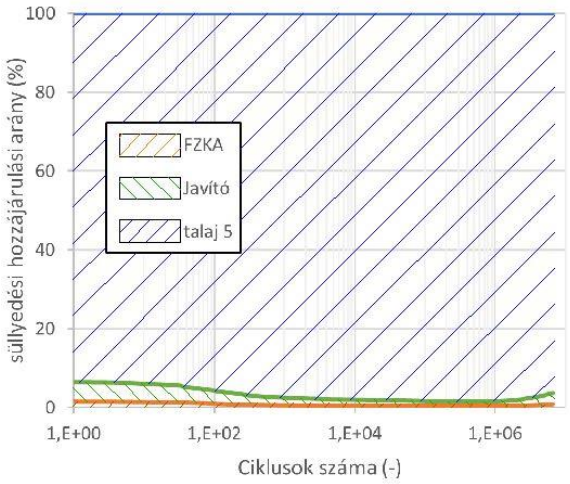
Az egyes szerkezeti rétegek süllyedési hozzájárulási arányát a teljes süllyedésekhez az A-C-E-R forgalmi terhelési osztályokban a „talaj 5” és „talaj 2” altalaj esetére a 3.11 ábra és 3.12. ábra szemlélteti.



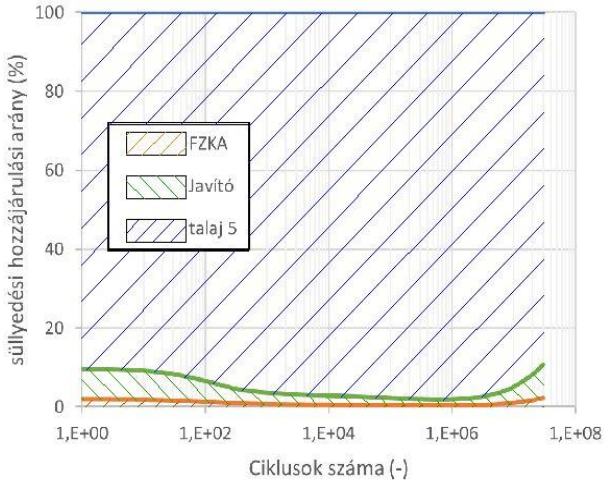

a) „A” terhelési osztály




b) „C” terhelési osztály

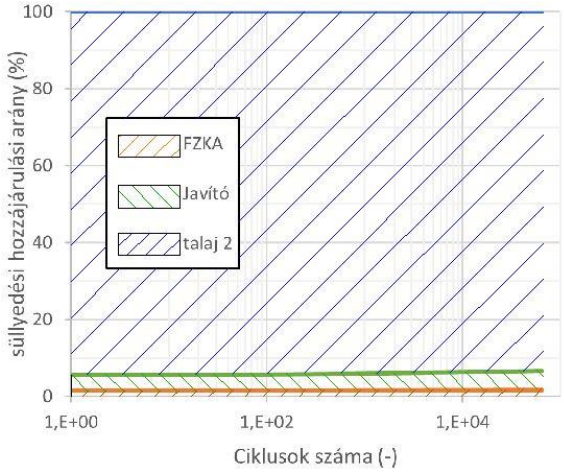



c) „E” terhelési osztály

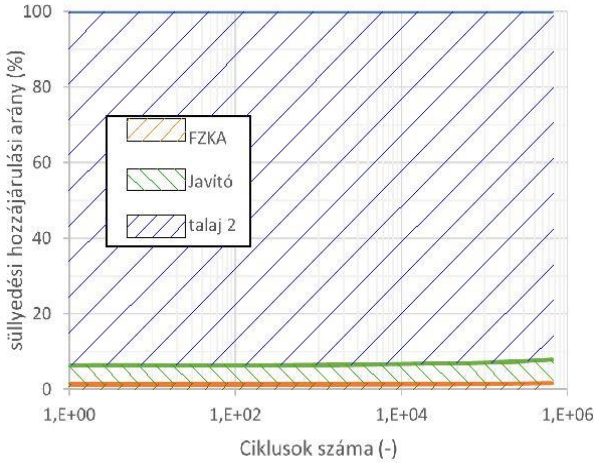



d) „R” terhelési osztály

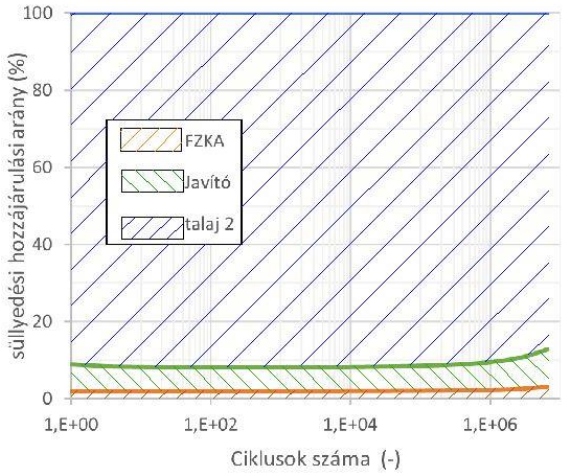
3.11 ábra: az egyes rétegekben kialakuló süllyedések aránya a teljes süllyedéshez képest a ciklusok számának függvényében „talaj 5” altalaj



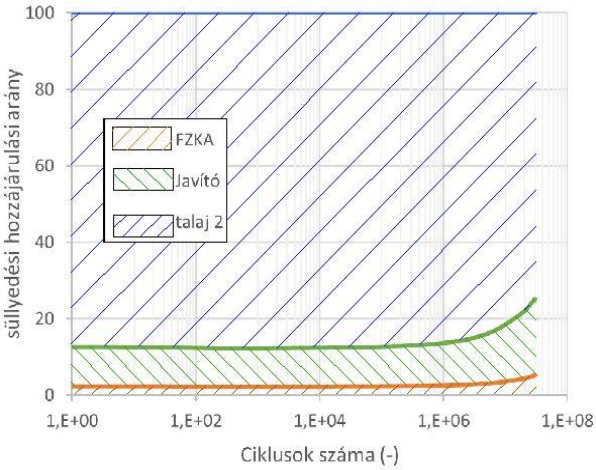

a) „A” terhelési osztály




b) „C” terhelési osztály




c) „E” terhelési osztály




d) „R” terhelési osztály

3.12. ábra: az egyes rétegekben kialakuló süllyedések aránya a teljes süllyedéshez képest a ciklusok számának függvényében „talaj 2” altalaj

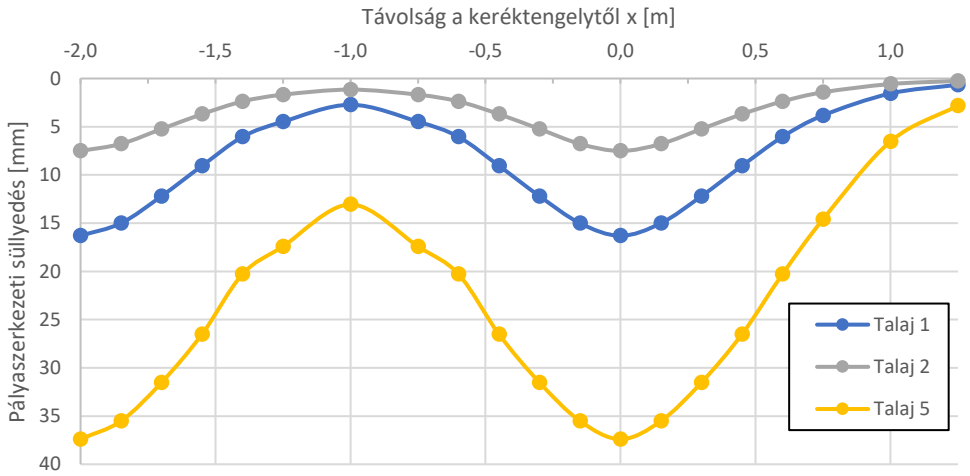
A téziscsoporthoz kapcsolódó publikációk: (Vámos and Szendefy, 2024a)

## 3. Téziscsoport

A pályaszerkezeti relatív süllyedéskülönbségek, illetve a deformálódott talajból az aszfaltban esetlegesen keletkezhető maximális többlet hajlító-húzóigénybevételek és megnyúlások meghatározása érdekében vizsgálatokat folytattam és kiszámítottam az FZKA felszínén értelmezett behajlási teknő, illetve a süllyedések síkbeli kiterjedését. Ennek érdekében a kerék szimmetriatengelyétől eltérő keresztmetszetekben meghatároztam a HCA-modell segítségével a halmozódó alakváltozásokat és süllyedéseket úgy, hogy figyelembe vettem a szomszédos abroncsokkal való kölcsönhatást is.

### 3.1. Tézis

**Meghatároztam a „C" terhelési osztályra és a mértékadó „talaj 1"-„talaj 2"-„talaj 5" altalajra az FZKA felszínén értelmezett behajlási teknőt és számítással meghatároztam a pályaszerkezet relatív süllyedéskülönbségeit. Számításokkal igazoltam, hogy az altalaj hatása a pályaszerkezeti relatív süllyedéskülönbségekre is jelentős, és a kerék tengelyében számított süllyedésekre vonatkozó tendencia továbbra is megmarad, ugyanakkor az egyes altalajtípusok közötti arányok kissé kiegyenlítődnek 3.13 ábra és 3.6 táblázat:**



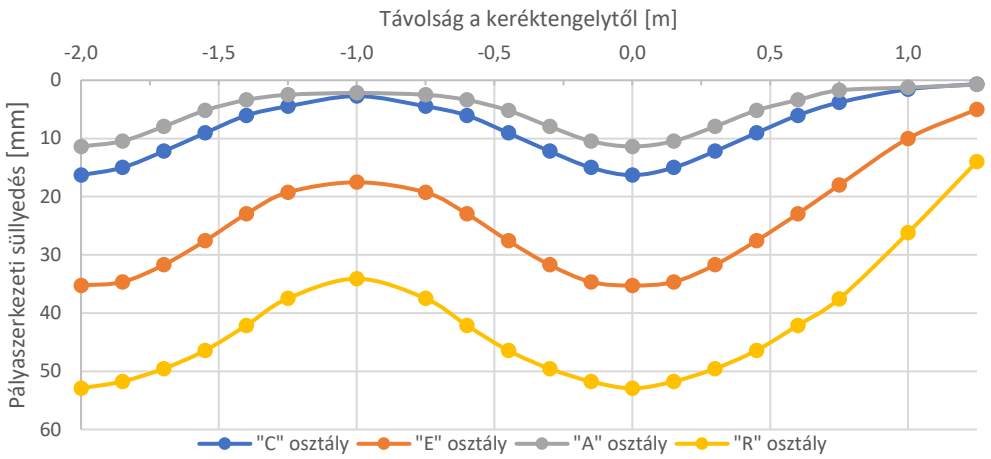

3.13 ábra: Az FZKA felszínén számított behajlási teknő a „C" terhelési osztály és „talaj 1"-„talaj 2"-„talaj 5" altalaj esetére

3.6. táblázat: A számított pályaszerkezeti süllyedések és süllyedéskülönbségek „C" terhelési osztály esetén

| Altalaj | $D_0$ ( x = 0 m) (mm) | D (x = -1,0 m) (mm) | Süllyedéskülönbség (mm) |
|---|---|---|---|
| talaj 1 | 16,30 | 3,11 | 13,19 |
| talaj 2 | 7,51 | 1,15 | 6,36 |
| talaj 5 | 37,40 | 13,06 | 24,34 |

### 3.2. Tézis

**Meghatároztam az A-C-E-R terhelési osztályokra és adott altalajra az FZKA felszínén értelmezett behajlási teknőt és kiszámítottam a pályaszerkezet relatív süllyedéskülönbségeit (3.14 ábra és 3.7 táblázat). Kimutattam, hogy a pályaszerkezeti süllyedéskülönbség az A-C-E terhelési osztályokban növekszik, majd az R osztálynál a számottevően növekvő abszolút süllyedés ellenére sincs érdemi növekedés a relatív süllyedéskülönbségekben.** Megállapítottam, hogy ennek oka a vastagabb aszfaltburkolat jobb tehereloszto hatása miatt van.




3.14 ábra: Az FZKA felszínén számított behajlási teknő az „A”-„C”-„E”-„R” terhelési osztályokban „talaj 1” altalaj esetén

3.7. táblázat: Az FZKA felszínén számított pályaszerkezeti süllyedések és süllyedéskülönbségek az egyes terhelési osztályokban „talaj 1” altalaj esetére

| Terhelési osztály | $D_0$ ( x = 0 m) (mm) | D (x = -1,0 m) (mm) | Süllyedéskülönbség (mm) |
|---|---|---|---|
| „A” | 11,37 | 2,19 | 9,18 |
| „C” | 16,30 | 3,11 | 13,19 |
| „E” | 35,26 | 17,53 | 17,73 |
| „R” | 52,12 | 34,09 | 18,03 |

### 3.3. Tézis

A behajlási teknőt leírhatjuk a (Primusz and Tóth, 2009) féle behajlásmérésre vonatkozó függvénnyel és **kimutattam, hogy az így számítható képlékeny alakváltozásokból létrejövő lehetséges maximális aszfaltszélsőszál megnyúlása többszörösen felülmúlja a rugalmas behajlásból származó igénybevételeket. Ajánlásokat adtam a különböző terhelési osztályok és altalajtípusok behajlási teknő alakténye**zőjére **vonatkozóan (3.8.** táblázat**és 3.9. táblázat).**

3.8. táblázat: számított lehetséges maximális aszfaltszélsőszál megnyúlások, görbületi sugarak és behajlási teknő alaki tényezők „C” terhelési oszály esetén

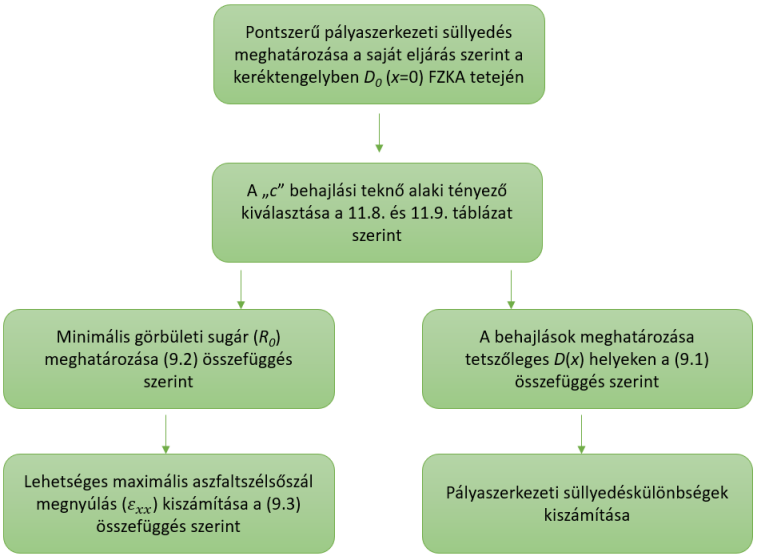
| altalaj | $\varepsilon_{xx}$ (microstrain) | $R_0$ (m) | c (-) |
|---|---|---|---|
| talaj 1 | 10.798 | 6,95 | 0,397 |
| talaj 2 | 6.587 | 11,39 | 0,526 |
| talaj 5 | 15.672 | 4,79 | 0,251 |
| rugalmas | 142 | 526,59 | 0,255 |

3.9. táblázat: A számított lehetséges maximális aszfaltszélsőszál megnyúlások, görbületi sugarak és behajlási alaki tényezők az egyes terhelési osztályokban „talaj 1” altalaj esetére

| Terhelési osztály | $\varepsilon_{xx}$ (microstrain) | $R_0$ (m) | c (-) |
|---|---|---|---|
| „A” | 7.046 | 7,09 | 0,557 |
| „C” | 10.797 | 6,94 | 0,397 |
| „E” | 14.496 | 7,58 | 0,168 |
| „R” | 13.867 | 10,45 | 0,083 |

### 3.4. Tézis

**Kidolgoztam egy egyszerűsített méretezési eljárást, amely a képlékeny alakváltozásokból származó lehetséges maximális többlet aszfaltmegnyúlást és a pályaszerkezeti süllyedéskülönbségeket becsüli. A méretezési eljárás menetét a 3.15. ábra szemlélteti:**



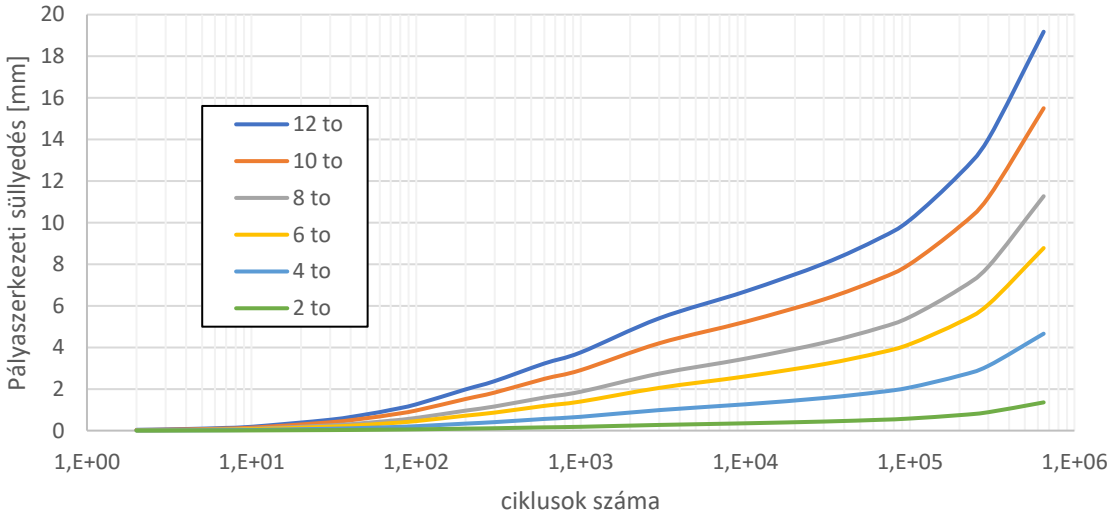

3.15. ábra: Egyszerűsített méretezési eljárás a talaj utólagos összenyomódásából származó lehetséges maximális többlet aszfalt igénybevételek és pályaszerkezeti süllyedéskülönbségek meghatározására

A téziscsoporthoz kapcsolódó publikációk: (Vámos and Szendefy, 2024b)

## 4. Téziscsoport

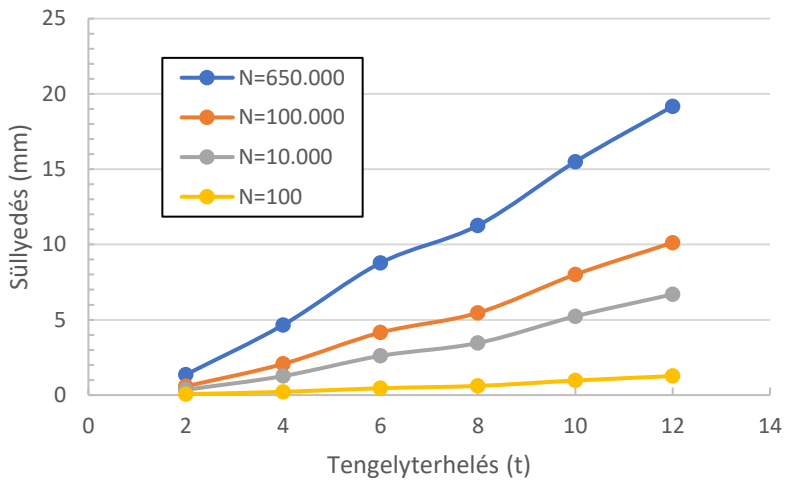
### 4.1. Tézis

Vizsgálatokat folytattam a „C" terhelési osztálynak megfelelő rétegrenddel 2-4-6-8-10-12 tonna között változtatott tengelyterheléssel és **kiszámítottam az FZKA felszínén az így várható süllyedések spektrumát a ciklusok számának függvényében 3.16 ábra.**




3.16 ábra: Az FZKA tetején az eltérő terhelésből számítható süllyedések „C" terhelési osztály és „talaj 1" altalaj esetén. (Vámos and Szendefy, 2024b)

**Kimutattam, hogy a tengelyterhelés csökkentésével csökken a süllyedéseket befolyásoló altalajzóna mélysége. Kimutattam, hogy változatlan ciklusszám esetén a számított süllyedések a tengelyterheléssel egyenesen arányosan növekednek (3.17 ábra):**




3.17 ábra: Az FZKA tetején számított süllyedések a tengelyterhelés függvényében (Vámos and Szendefy, 2024b)

**Meghatároztam az egységtengellyel és szabványos tervezési forgalommal egyenértékű süllyedéshez szükséges ciklusok számát a vizsgált 2-4-6-8-10-12 tonna tengelyterhelések esetére 3.10. táblázat:**

3.10. táblázat: Az egyenértékű süllyedéshez szükséges tengelyáthaladások száma, illetve ezek aránya a szabványos tervezési forgalomhoz az egységtengelyből.

| Tengelyterhelés (t) | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $N_{szükséges}$ | 13 750 000 | 4 450 000 | 1 850 000 | 1 235 000 | 650 000 | 385 000 |
| $N_i/N_{10to}$ | 21,15 | 6,85 | 2,85 | 1,90 | 1,00 | 0,59 |

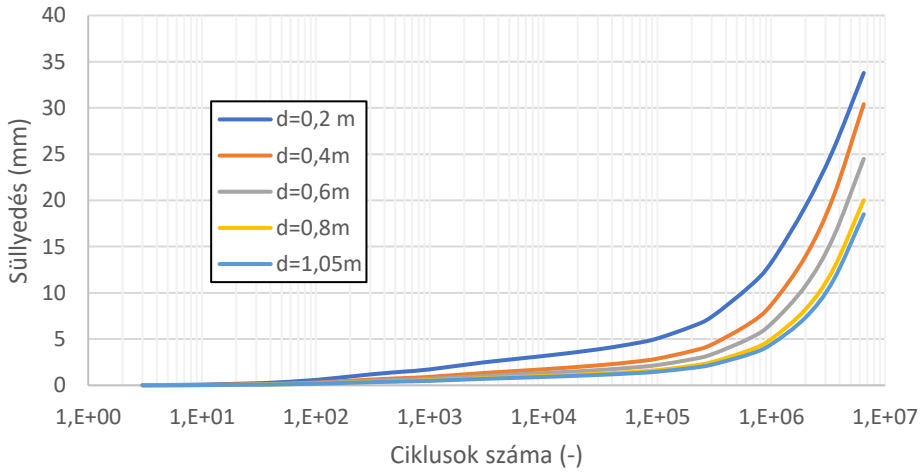
**Ajánlást adtam az egységtengellyel egyenértékű süllyedést okozó ciklusok számához tetszőleges tengelyterhelésre $R^2$ = 0,971 mellett:**

$$N_{szükséges} = e^{16,884 - \frac{Tengelyterhelés\ (t)}{2,826}} \tag{3.5}$$

Ahol, $N_{szükséges}$ az egyenértékű süllyedéshez szükséges tengelyáthaladások száma
e az Euler-féle szám
Tengelyterhelés a ténylegesen működő tengelyterhelés tonnában

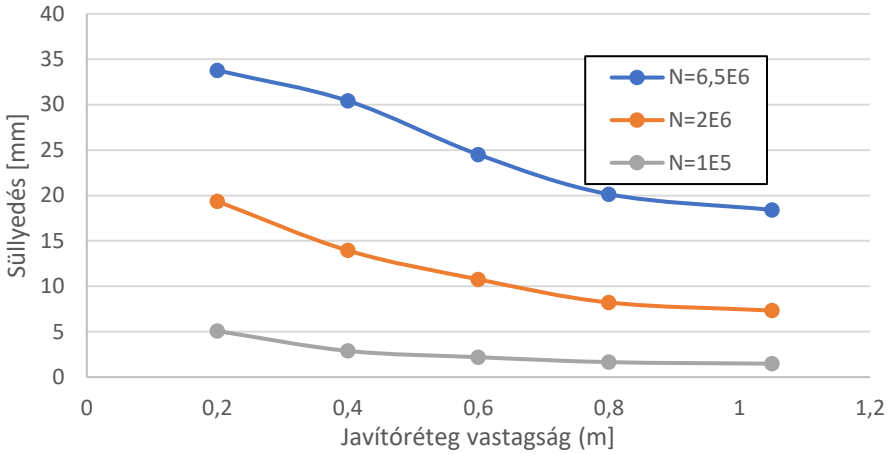
### 4.2. Tézis

A javítóréteg vastagságának hatását vizsgáltam a keréktengelyben az FZKA felszínén számított süllyedésekre az „E” terhelési osztály és „talaj 1” altalaj esetén. **Számításaimmal kimutattam, hogy a javítóréteg vastagságának növelésével milyen mértékben csökkenthetőek a halmozódó süllyedések 3.18 ábra:**



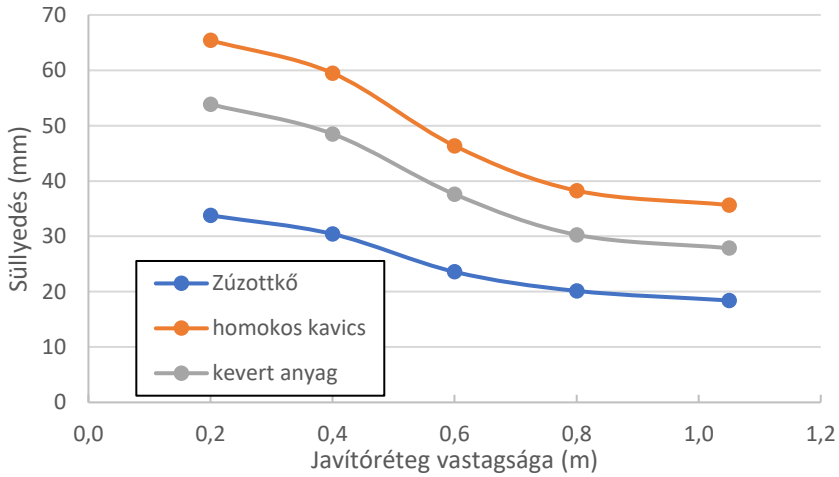

3.18 ábra: A süllyedés-ciklusszám görbék különböző javítóréteg vastagságokra, „E” terhelési osztály, „talaj 1” altalaj

**Megállapítottam, hogy gazdaságossági szempontból *d*=0,8 m-es vastagság fölött már nem érhető el érdemi redukció a süllyedésekben (3.19 ábra):**




3.19 ábra: A számított süllyedések adott ciklusszám esetén a javítóréteg vastagságának függvényében

Vizsgálatot folytattam a javítóréteg anyagának és a szemcsealak minőségi tulajdonságainak a süllyedésekre gyakorolt hatásáról. Ennek során vizsgáltam a törtszemcséjű, a természetes lekerekített szemcséjű és az 50%-50%-os keverési arányú anyagot. **Számításokkal kimutattam, hogy a süllyedéseket a javítóréteg minősége döntően befolyásolja és a törtszemcsés és lekerekített szemcséjű anyag süllyedése között közel kétszeres a különbség 3.20 ábra:**

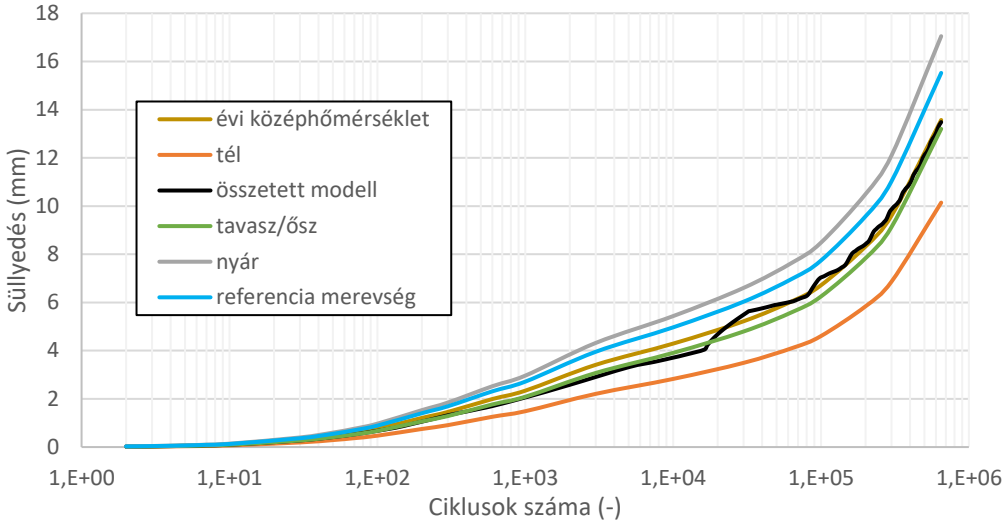



3.20 ábra: A számított süllyedések az élettartam végén a javítóréteg anyagának és vastagságának függvényében

A lekerekített anyagú javítóréteg még *d*=1,05 m esetén is nagyobb süllyedéseket szenved, mint a *d*=0,2 m vastag törtszemcséjű javítóréteg. **Ez alapján ajánlást tettem, hogy a pályaszerkezeti süllyedések és a relatív süllyedéskülönbségek hatékony csökkentéséhez nem csak a javítóréteg vastagsága, de a jó minőségű, tört anyagú zúzottkőből készülő réteg is elengedhetetlen.**

### 4.3. Tézis

Vizsgálatokat folytattam az évszakos hőmérsékletingadozásból következő eltérő merevségű aszfaltburkolat süllyedésekre gyakorolt hatásáról. Ennek során a „C" terhelési osztályt és a „talaj 1" altalajt vizsgáltam. A számításokban először a „tiszta" eseteket vizsgáltam, vagyis az egyes évszakokra jellemző alakváltozási amplitúdót fixnek választottam a teljes élettartam alatt, **így meghatároztam az évszakos hőingadozástól függő aszfaltmerevség süllyedési tartományait (3.21 ábra):**

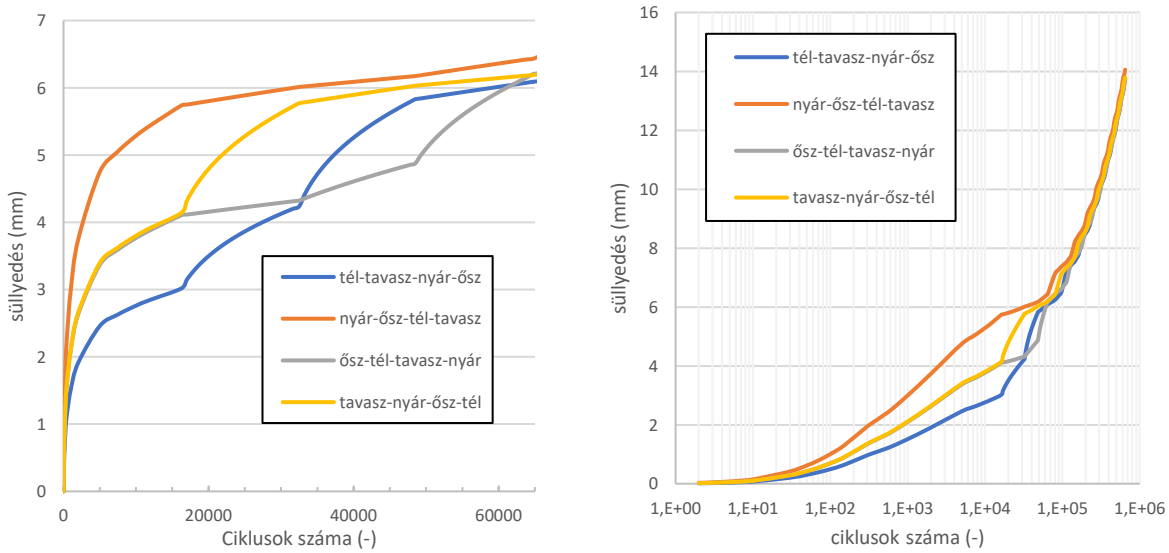



3.21 ábra: Az FZKA felszínén számított süllyedések az évszakos hőmérsékletnek megfelelő aszfaltmerevség függvényében

**Számításokkal igazoltam, hogy az évi középhőmérsékletnek megfelelő aszfaltmerevség alapján számított, a teljes élettartam alatt fixált alakváltozási amplitúdóból azonos nagyságú süllyedések keletkeznek, mint ha a tél-tavasz-nyár-ősz évszakokban számított alakváltozási amplitúdókat, mint egymást követő cikluscsomagokat vesszük figyelembe.**

A szakirodalomban fellelhető laboratóriumban meghatározott referencia aszfaltmerevégek alapján számolt süllyedések cca. 15%-kal nagyobbak, mint az évi középhőmérséklet alapján számított süllyedések. **Ajánlást tettem, hogy az ismétlődő forgalmi terhelésből keletkező süllyedések pontos meghatározásakor az éves középhőmérséklet alapján célszerű figyelembe venni az aszfaltmerevséget.**

Megvizsgáltam, hogy milyen hatása van a cikluscsomagok sorrendjének, vagyis mikor történik az útpálya forgalomba vétele, számít-e, hogy az útpálya mikor kapja meg a nyári lágyabb aszfaltból következő magasabb feszültségeket. Ennek során a cikluscsomagok sorrendjét a lehetéges évszak-komibinációk alapján változtattam és az eredményeket értékeltem. **Számításokkal kimutattam, hogy a cikluscsomagok sorrendjének csak az első év végéig van számottevő szerepe. A ciklusok számának növelésével a kezdeti különbségek eltűnnek és a görbék összetartanak, az élettartam végére a különbség < 2% (3.22 ábra):**



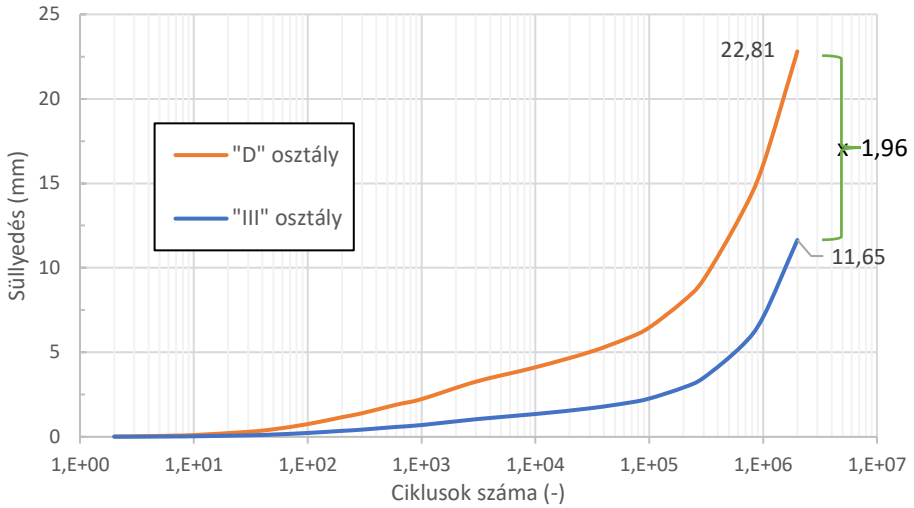

a) b)

3.22 ábra: A cikluscsomagok sorrendjének hatása a süllyedésekre a) az első évben lineáris ábrázolásban b) a teljes élettartam alatt szemilogaritmikus ábrázolásban

### 4.4. Tézis

Összehasonlítottam a magyar e-UT06.03.13 Útügyi Műszaki Előírás szerinti típus pályaszerkezetek teherbírás követelményeit a nemzetközi empirikus alapokon nyugvó méretezési eljárásokkal. Ennek során megállapítottam, hogy a teherbírási követelményekben nincs számottevő különbség sem az altalajra, sem a zúzottkő alaprétegre vonatkozóan. Összehasonlítottam a magyar e-UT06.03.13 „D" forgalmi terhelési osztály rétegrendjét az azonos forgalmi terhelésű német RstO „III" kategóriájú rétegrendjével. Megállapítottam, hogy a német előírás sokkal szigorúbb mind a zúzottkő alaprétegre, mind az aszfalt vastagságára vonatkozóan.

**Számításokkal kimutattam, hogy a keréktengelyben az FZKA felszínén számított süllyedések azonos tulajdonságú altalaj és azonos intenzitású, 2 millió ismétlésszámú forgalmi terhelésből a magyar e-UT06.03.13 „D" forgalmi terhelési osztályának előírt rétegrendjével 1,96-szor nagyobbak, mint a német RStO „III" kategóriájának rétegrendje által számított süllyedések (3.23 ábra):**




3.23 ábra: A magyar e-UT06.03.13 „D" terhelési osztályának és a német RStO „III" kategóriájának süllyedései a ciklusszám függvényében.

A téziscsoporthoz kapcsolódó publikációk: (Vámos and Szendefy, 2024b, 2024c, 2024d)

# 4 EREDMÉNYEK HASZNOSÍTHATÓSÁGA ÉS TOVÁBBI KUTATÁSI LEHETŐSÉGEK

A dolgozat egy számítási eljárást mutat be a hajlékony pályaszerkezetek talaj eredetű süllyedésének meghatározására és átfogó képet ad a főbb befolyásoló tényezőkről. A bemutatott módszerrel már a tervezési fázis alatt becsülni lehet a várt pályaszerkezeti süllyedéseket, így megfelelő intézkedésekkel elkerülhető az útszerkezet használhatóságának korlátozása. Remélhetőleg a disszertáció megállapításai segítségével olyan kutatások indulnak meg, amely a hazai közúthálózat minőségi javulását eredményezi. Személy szerint a kutatás legfontosabb eredményének a javítóréteg vastagságára és anyagi minőségére vonatkozó eredményeket tartom, hiszen ezek segítségével tudjuk leghatékonyabban csökkenteni a kialakuló süllyedéseket.

A megállapított pontszerű és pályaszerkezeti süllyedések elsőre kissé túlzónak tűnhetnek. Ennek oka a számítás során egyes, a biztonság javára tett egyszerüsítések, amelyeket a jövőben pontosítani kívánok. Elsőnek kiemelhetjük a hőmérsékletfüggő aszfaltmerevség szerepét. A kutatás során megállapítottam, hogy a laboratóriumban mért referencia aszfaltmerevség nincs összhangban a ténylegesen működő, az éves középhőmérséklet alapján számolt aszfaltmerevséggel. Ennek következtében a dolgozatban megadott süllyedések ca. 15%-kal nagyobbak, mint azt tényleges körülmények között várhatnánk. Másodsorban fontos kiemelni, hogy számításaim során azt feltételeztem, hogy a kerekek tengelytávolsága fixen 2,0 m-t tesz ki és a kerekek pozíciója a keresztmetszetben változatlan. A valóságban a járművek tengelytávolsága eltérő és az egyes áthaladások sem mindig a sáv szimmetriatengelyében mennek végbe. Amennyiben feltételezzük, hogy az egyes járművek bizonyos szórással haladnak a sáv középvonala körül, úgy adódik, hogy a számított maximális süllyedések kisebbek lesznek, míg a keréktengelytől *x* távolságra lévő pontokban nagyobbak. Ennek megfelelően a pályaszerkezet abszolút süllyedése és relatív süllyedéskülönbségei realisztikusabb értéket mutatnak.

A számítások során feltételeztem továbbá, hogy a terhelés minden esetben az egységtengellyel azonos. A valóságban azonban az egyes gépjárműosztályokban ettől eltérő, és jellemzően kisebb terhelésű járművek

közlekednek. Célszerűnek tartom, hogy a jövőben a forgalomban résztvevő gépjárművel pl. statisztikai adatokra támaszkodva a tényleges tengelyterheléssel legyenek figyelembe véve a számításokban.

A végső süllyedéseket az előterhelésből fakadó feszültség és alakváltozás eloszlás befolyásolja. Kutatásomban az építés közbeni előterhelés értékét gyakorlati tapasztalatok alapján vettem fel. A továbbiakban kutatásokat tervezek végezni az ettől eltérő előterhelés hatásáról.

Kutatásom során nem vizsgáltam a földmű elnedvesedéséből fakadó kedvezőlen hatásokat. Mivel a valóságban fellépő károsodások gyakran az elégtelen vízelvezetésből fellépő átnedvesedéssel és az abból következő merevség leromlásból következnek, fontosnak tartom, hogy a jövőben ennek hatását is megvizsgáljam.

Utolsó pontként kiemelném, hogy az eredmények megbízhatósága nagyban függ a talajok bemenő HCA paramétereitől, amelyet kizárólag irodalmi korrelációk segítségével határoztam meg. Célszerűnek tartom a jövőben a hazai útépítési gyakorlatnak megfelelő anyagokon való laboratóriumi vizsgálatokat, melyek segítségével a HCA paraméterek pontosabban becsülhetőek.

# 5 PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE

## 5.1 Az értekezés tézispontjaihoz kapcsolódó saját publikációk

### 5.1.1 Külföldön megjelent idegen nyelvű folyóiratcikk


Vámos, M.J., Szendefy, J., 2023a. Calculation Method for Traffic Load-Induced Permanent Deformation in Soils under Flexible Pavements. Geotechnics 2023, *3*(3), 955-974, https://doi.org/10.3390/geotechnics3030051

Vámos, M.J., Szendefy, J., 2024a. Determination of Permanent Deformations of Non-Cohesive Soils in Pavement Structures under Repeated Traffic Load. Eng 5, 1067–1084. https://doi.org/10.3390/eng5020058

Vámos, M.J., Szendefy, J., 2024b. On the Influencing Factors of Non-Asphalt Originated Rutting in Flexible Pavements. Transp. Infrastruct. Geotechnol. https://doi.org/10.1007/s40515-024-00441-3

Vámos, M.J., Szendefy, J., 2024c. Temperature Effects on Traffic Load-Induced Accumulating Strains in Flexible Pavement Structures. Int. J. Pavement Res. Technol. megjelenés alatt. https://doi.org/10.1007/s42947-024-00466-4


### 5.1.2 Magyarországon megjelent idegen nyelvű folyóiratcikk


Vámos, M.J., Szendefy, J., 2023b. Overconsolidated Stress and Strain Condition of Pavement Layers as a Result of Preloading during Construction. Period. Polytech. Civ. Eng. 2023, 67(4), 1273-1283. https://doi.org/10.3311/PPci.22258


### 5.1.3 Magyarországon megjelent magyar nyelvű folyóiratcikk


Vámos M.J., Szendefy J., 2024d. Magyar és német típus-pályaszerkezetek várható süllyedéseinek összehasonlítása. ÚTÜGYI LAPOK, megjelenés alatt.


## 5.2 Egyéb publikációk

### 5.2.1 Nemzetközi konferencia kiadványában megjelent idegen nyelvű publikáció


Vámos, M.J., Szendefy, J., 2014. Effect of pre-loading on dynamic soil properties and deformation characteristics, in: Proceedings of the 23rd European Young Geotechnical Engineering Conference. Barcelona, Spanyolország, pp. 11–14. Kiadó: ISSMGE London

Kissel, W., Vámos, M., Ramm, H. , Reul, O., 2020, Besondere Anforderungen an Setzungsprognose und Messverfahren am Beispiel des Teilchenbeschleunigers FAIR. in: Messen in der Geotechnik 2020, Heft 110, S. 59–85. Braunschweig: Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig


### 5.2.2 Magyarországon megjelent magyar nyelvű folyóiratcikk


Szendefy, J, Vámos M.J., 2014. A mésszel stabilizált talajok teherbírásának tartóssága, fagyállósága, Útügyi Lapok, 2 (3) 10p (2014)

Szendefy, J, Vámos M.J., 2014. Egyszerűsített és módosított Proctor-vizsgálati eredmények összehasonlítása I. Műszaki Ellenőr, 3 (11) pp 39-42 (2014)

Szendefy, J, Vámos M.J., 2014. Egyszerűsített és módosított Proctor-vizsgálati eredmények összehasonlítása II., Műszaki Ellenőr, 3 (11) pp 41-44 (2014)


### 5.2.3 Magyar nyelvű konferencia kiadványában, megjelent publikáció


Vámos, M.J., Szendefy, J., 2019. Laborvizsgálat homokok ciklikus alakváltozási tulajdonságainak meghatározásához, in: 5. Kézdi Konferencia Tanulmánykötete, pp 204-231, Budapest, Magyarország

Back, M.,Vámos, M.J., 2015. Telített és telítetlen lösz talajok dinamikus alakváltozási tulajdonságait befolyásoló tényezők, In: Köllő G (szerk.) XIX. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia, pp 8-11, Csíksomlyó, Románia

Szendefy, J., Vámos, M.J., 2015. Újgenerációs hidraulikus kötőanyagkeverék laboratóriumi vizsgálati eredményeinek bemutatása, In: Köllő G (szerk.) XIX. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia, pp 207-210, Csíksomlyó, Románia

Vámos, M.J., Szendefy, J., 2015. Modified Cam clay anyagmodell alkalmazása talajok ciklikus viselkedésének leírására, In: Köllő G (szerk.) XIX. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia, pp 233-236, Csíksomlyó, Románia

Vámos, M.J., Szendefy, J., 2015. , In 4. Kézdi Árpád Emlékkonferencia Tanulmánykötete, pp238-248, Budapest, Magyarország

Szendefy, J., Vámos, M.J., 2014. Tömegstabilizáció első magyarországi tapasztalatai, In: Köllő G (szerk.) XVIII. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia, pp 289-292, Csíksomlyó, Románia

Vámos, M.J., Szendefy, J., 2014. KÖVÉR AGYAGOK DINAMIKUS ALAKVÁLTOZÁSI TULAJDONSÁGAINAK MEGHATÁROZÁSA, In: Köllő G (szerk.) XVIII. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia, pp 325-328, Csíksomlyó, Románia

Szendefy, J., Vámos, M.J., 2014. Újgenerációs kötőanyag az átmeneti talajok stabilizálásához, In: Geotechnika 2014 Konferencia, Paper 19, pp 15, Ráckeve, Magyarország

Vámos, M.J, Szendefy, J., 2014. Kövér agyagok dinamikus alakváltozási tulajdonságait befolyásoló tényezők, In: Geotechnika 2014 Konferencia, pp 1-15, Ráckeve, Magyarország

### 5.2.4 Könyv, Konferenciakötet

Vámos, M.J, Szendefy, J. 2015. 4. Kézdi Árpád Emlékkonferencia Tanulmánykötete. Budapest: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék, 254 p. (2015)

### 5.2.5 Könyv (oktatási anyag)

Kovács, M, Szendefy, J., Vámos, M.J. 2014. Earthworks – Elektronikus jegyzet az „Earthworks” c. tantárgyhoz. BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék, 2014

# 6 HIVTKOZÁSOK


AASHTO, 2002. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials.

Albayati, A.H., 2023. A review of rutting in asphalt concrete pavement. Open Eng. 13, 20220463. https://doi.org/10.1515/eng-2022-0463

Austroads, 2019. Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design.

e-UT 06.03.13:2005, n.d. Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezése és megerősítése, Útügyi Műszaki Előírás.

Gajári, G., 2019. A hengerelt aszfalt, mint részben telített, lehulés okozta izotróp sajátfeszültséggel bíró szemcsés anyag, viszko-hypoplasztikus anyagmodellje. Az Aszfalt XXVI. évfolyam, 58–72.

Gajári, G., Kisgyörgy, L., Ádány, S., Mahler, A., Lógó, J., 2021. A Visco-hypoplastic Constitutive Model for Rolled Asphalt. Period. Polytech. Civ. Eng. https://doi.org/10.3311/PPci.17515

KSH, 2024. Éves összefoglaló táblák (2023) a szállítás közlekedés témakörében 24.1.1. táblázatok.

Magyar Közút, N.Zrt., 2024. AZ ORSZÁGOS KÖZÚTHÁLÓZAT INFORMÁCIÓS EREDMÉNYTÁBLÁI 2023.

Morris, J., 1973. The prediction of permanent deformation in asphalt concrete pavements. USA Transp. Group.

Niemunis, A., 2003. Extended hypoplastic models for soils (habilitáció). INSTITUTES FÜR GRUNDBAU UND BODENMECHANIK DER RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM, Bochum.

Niemunis, A., Wichtmann, T., Triantafyllidis, Th., 2005. A high-cycle accumulation model for sand. Comput. Geotech. 32, 245–263. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2005.03.002

Primusz, P., Tóth, Cs., 2009. A behajlási teknő geometriája. Közlekép. Szle. 2009/12, 18–24.

Qi, H., Zhang, X., Liu, J., Zhang, T., Lv, G., Cui, L., Xie, Q., 2022. Study on Deformation Characteristics of Low-Highway Subgrade under Traffic Load. Appl. Sci. 12, 3406. https://doi.org/10.3390/app12073406

RDO -Asphalt 09, 2009. Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht.

Singh, A.K., Sahoo, J.P., 2021. Rutting prediction models for flexible pavement structures: A review of historical and recent developments. J. Traffic Transp. Eng. Engl. Ed. 8, 315–338. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.04.003

Tóth, C., Primusz, P., 2020. New Hungarian Mechanistic-Empirical Design Procedure for Asphalt Pavements. Balt. J. Road Bridge Eng. 15, 161–186. https://doi.org/10.7250/bjrbe.2020-15.466

Uzan, J., 2004. Permanent Deformation in Flexible Pavements. J. Transp. Eng. 130, 6–13. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:1(6)

Vámos, M.J., Szendefy, J., 2024a. Determination of Permanent Deformations of Non-Cohesive Soils in Pavement Structures under Repeated Traffic Load. Eng 5, 1067–1084. https://doi.org/10.3390/eng5020058

Vámos, M.J., Szendefy, J., 2024b. On the Influencing Factors of Non-Asphalt Originated Rutting in Flexible Pavements. Transp. Infrastruct. Geotechnol. megjelenés alatt. https://doi.org/10.1007/s40515-024-00441-3

Vámos, M.J., Szendefy, J., 2024c. Temperature Effects on Traffic Load-Induced Accumulating Strains in Flexible Pavement Structures. Int. J. Pavement Res. Technol. megjelenés alatt. https://doi.org/10.1007/s42947-024-00466-4

Vámos, M.J., Szendefy, J., 2023a. Calculation Method for Traffic Load-Induced Permanent Deformation in Soils under Flexible Pavements. Geotechnics.

Vámos, M.J., Szendefy, J., 2023b. Overconsolidated Stress and Strain Condition of Pavement Layers as a Result of Preloading during Construction. Period. Polytech. Civ. Eng. https://doi.org/10.3311/PPci.22258

Vámos M.J., Szendefy J., 2024d. Magyar és német típus-pályaszerkezetek várható süllyedéseinek összehasonlítása. ÚTÜGYI LAPOK megjelenés alatt.

Verstraeten, J., Veverka, V., Francken, L., 1982. Rational and Practical Designs of Asphalt Pavements to Avoid Cracking and Rutting., in: Proceedings Fifth International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, 5. Delft University of Technology, pp. 45–58.

Werkmeister, S., 2003. Permanent Deformation Behaviour of Unbound Granular Materials in Pavement Constructions (Ph.D. értekezés). TU Dresden, Drezda.

White, T.D., Haddock, J.E., Hand, A.J.T., Fang, H., 2002. Contributions of Pavement Structural Layers to Rutting of Hot Mix Asphalt Pavements, NCHRP Report 468. National Academy Press, Washington D.C.

Wichtmann, T., 2016. Soil behaviour under cyclic loading - experimental observations, constitutive description and applications (habilitáció).

Wichtmann, T., 2005. Explicit Accumulation Model for Non-cohesive Soils under Cyclic Loading, Schriftenreihe des Institutes für Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum. Bochum.

Wichtmann, T., Niemunis, A., Triantafyllidis, T., 2015. Improved simplified calibration procedure for a high-cycle accumulation model. Soil Dyn. Earthq. Eng. 70, 118–132. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.12.011

Wichtmann, T., Niemunis, A., Triantafyllidis, T., 2014. Flow rule in a high-cycle accumulation model backed by cyclic test data of 22 sands. Acta Geotech. 9, 695–709. https://doi.org/10.1007/s11440-014-0302-7

Wichtmann, T., Rondón, H., Niemunis, A., Triantafyllidis, T., Lizcano, A., 2010. Prediction of Permanent Deformations in Pavements Using a High-Cycle Accumulation Model. J. Geotech. Geoenvironmental Eng. 136. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000275

Wichtmann, T., Triantafyllidis, T., 2015. Inspection of a high-cycle accumulation model for large numbers of cycles (N=2 million). Soil Dyn. Earthq. Eng. 75, 199–210. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.04.008

Wichtmann, T., Triantafyllidis, T., 2013. Effect of Uniformity Coefficient on G/Gmax and Damping Ratio of Uniform to Well-Graded Quartz Sands. J. Geotech. Geoenvironmental Eng. 139, 59–72. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000735

Wichtmann, T., Triantafyllidis, T., 2010. On the influence of the grain size distribution curve on P-wave velocity, constrained elastic modulus Mmax and Poisson's ratio of quartz sands. Soil Dyn. Earthq. Eng. 30, 757–766. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.03.006

Zeißler, A., 2021. Grundlagen zur Struktur- und Materialoptimierung von Asphaltbefestigungen (habilitáció). TU Drezda, Drezda.

Zhou, P., Cui, L., Zhang, X., Ma, C., Liu, J., Shao, Y., Lv, G., Xie, Q., 2022. Study on Deformation Characteristics of Extended Highway in Operation Period. Adv. Civ. Eng. 2022, 1–13. https://doi.org/10.1155/2022/5496999