

**Hajlékony útpályaszerkezetek
szükséges erősítőrétegének
meghatározása roncsolásmentes
teherbírásmérés alapján**



**Magyar Mérnöki Kamara
Kiadványsorozata 116.**

**Hajlékony útpályaszerkezetek szükséges
erősítőrétegének meghatározása roncsolásmentes
teherbírásmérés alapján**

**MMK FAP azonosító:
2023/207-KZT**

Budapest, 2023. október 16.

A sorozat szerkesztője:
WAGNER ERNŐ
a Magyar Mérnöki Kamara elnöke

Készült a Magyar Mérnöki Kamara Közlekedési Szakmai Tagozatának gondozásában, a 2023. évi Feladat Alapú Pályázatok pénzügyi keretéből.

A kiadvány a Magyar Mérnöki Kamara tulajdona. Másolása, teljes terjedelmében való közzététele csak a Kamara engedélyével lehetséges. Minden jog fenntartva.

Szerző:
Dr. Primusz Péter

Lektorálta:
Dr. Ambrus Kálmán Béla

Kiadó:

Magyar Mérnöki Kamara
1117 Budapest, Szerémi út 4.
fap@mmk.hu, www.mmk.hu

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés	7
1.1. A forgalom és a pályaszerkezet kapcsolata.....	8
1.2. A teherbírás- és a behajlásmérés kapcsolata.....	10
1.2.1.1. Roncsolásos dinamikai vizsgálatok	11
1.2.1.2. Roncsolásmentes dinamikai vizsgálatok	11
2. Teherbírásmérés.....	13
2.1. Kvázi statikus teherbírásmérés	13
2.1.1. Billenőkaros behajlásmérés	13
2.1.1.1. A mérés végrehajtása	14
2.1.1.2. A mérési eredmények értékelése	14
2.1.2. Automatizál behajlásmérő eszközök	15
2.1.2.1. Geobeam és társai.....	15
2.1.2.2. Lacroix-deflectográf.....	18
2.1.2.3. Curviameter	19
2.2. Dinamikus behajlásmérés.....	20
2.2.1. A terhelés és az elmozdulások rögzítése	21
2.2.2. A mérési adatok információ tartalma	22
2.2.3. A KUAB készülék.....	22
2.2.4. A Dynatest készülék.....	23
2.2.5. A Jils készülék.....	24
2.2.6. A könnyűsúlyú behajlásmérők.....	24
2.3. Teherbírásmérő berendezések összehasonlítása.....	26
3. Teherbírási adatok értelmezése.....	27
3.1. A mechanikai-empirikus méretezési módszer áttekintése.....	27
3.2. Anyagtulajdonságok visszaszámítása	29
3.2.1. A módszer fő lépései.....	31
3.2.2. Az iterációs hiba mérése.....	32
3.2.3. Visszaszámítás az ELLEA1 Excel munkafüzettel	32
3.3. Az aszfaltkeverékek viszkoelasztikus jellemzése	33
3.3.1. Idő- és frekvenciafüggő viselkedés.....	33
3.3.1.1. Kúszás.....	33
3.3.1.2. Feszültségrelaxáció	34
3.3.1.3. Anyagviselkedés ciklikus terhelésre	34

3.3.2.	Idő-hőmérséklet egyenértékűség elv	36
3.3.3.	A dinamikus és relaxációs modulus mestergörbe	37
3.4.	Útpályaszerkezet alakváltozások elemzése	38
3.4.1.	Kvázi statikus behajlásmérés mechanikai modellje	38
3.4.1.1.	Az ELLVA1 Excel munkafüzet	41
3.4.1.2.	Mintaszámítás	44
3.4.2.	Impulzusalapú behajlásmérés mechanikai modellje	48
3.4.2.1.	ViscoWave véges réteg program	49
3.4.2.2.	ViscoWave Excel munkafüzet	52
3.4.2.3.	Direkt modellezés ViscoWave-vel	54
3.4.2.4.	Visszaszámítás (egyetlen ejtésből) ViscoWave-vel	55
4.	A szükséges erősítőréteg vastagság meghatározása	57
4.1.	Helyszíni vizsgálatok	57
4.2.	Azonos teherbírású útszakaszok	57
4.3.	Méretezési modell összeállítása	59
4.4.	Hátralévő élettartam számítás	60
4.5.	A méretezés végrehajtása	61
5.	Összefoglalás	62
6.	Irodalomjegyzék	63

1. Bevezetés

Az országos közúthálózaton 2021 és 2025 között kb. 400 km útfelújítási munka várható. Azért, hogy a pénzügyi források jól hasznosuljanak pontosan ismernünk kell útjaink teherbírását, amit indirekt módon a helyszíni mérések feldolgozását követően tudunk meghatározni. A statikus behajlás nem reprezentálja hűen a forgalom dinamikus fárasztó hatását ezért napjainkban egyre nagyobb számban alkalmazzák a dinamikus igénybevételt megfelelően szimuláló nehézejtűsúlyos berendezéseket. Az egyes mérési eljárások eltérő adatokat szolgáltatnak a tervezők számára, ezért pontosan érteniük kell az egyes eszközök működési elvét, és az általuk szolgáltatott adatok információ tartalmát és alkalmazhatóságát a megerősítési munkákban.

Jelen mérnöki segédlet bemutatja a korszerű mechanikai alapokon nyugvó számítási eljárások felhasználásával a hajlékony útpályaszerkezetek teherbírásának értékelését a megerősítési munkákban. Elsődlegesen a roncsolásmentes teherbírásmérő eszközökkel (mint pl. a kézi behajlásmérés (Geobeam, ABBA), az FWD és a Curviametro) és az azokkal mért adatok feldolgozási lehetőségeivel (leginkább a visszaszámítással) foglalkozik. Feladata, hogy gyakorlatiasan és érthetően bemutassa a mechanikai alapú erősítőrétég méretezés alapjait a gyakorló mérnökök számára.

A segédlet kitér az eltérő elven nyugvó behajlásmérő módszerek főbb különbségeire, valamint az aszfaltok, mint viszkoelasztikus anyagok tulajdonságainak precízebb figyelembevételére a szükséges erősítőrétég vastagságának mértezésénél. A segédletet alapján a gyakorló mérnökök képesek lesznek a hajlékony útpályaszerkezetek teherbírását pontosan megállapítani a hazánkban előforduló roncsolásmentes eszközök méréseire támaszkodva, és így pontos út diagnózist tudnak majd felállítani. Képesse válnak az aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek szükséges erősítőrétégének vastagságát mechanikai elvekre támaszkodva meghatározni. Valamint beépíteni a méretezési folyamatba az aszfaltok, mint viszkoelasztikus anyagok legfontosabb tulajdonságait.

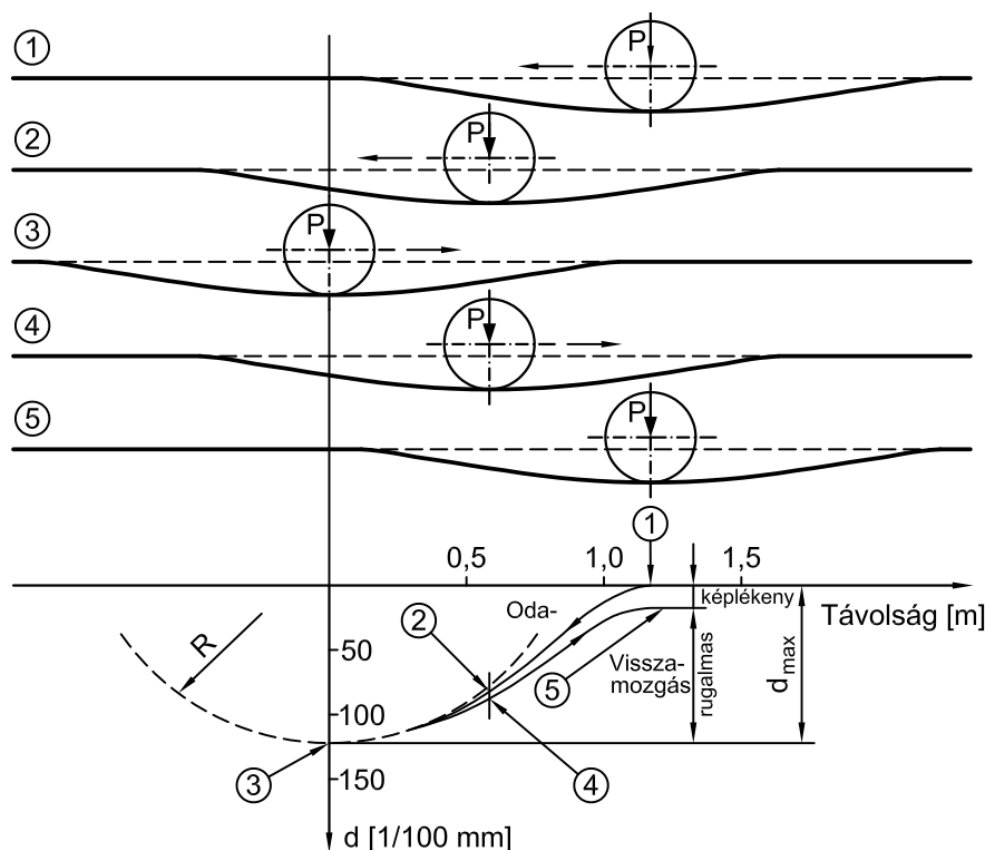
A mechanikai-empirikus méretezési módszerről jelen anyagban csak igen röviden értekezünk, ezért az Olvasónak erősen javasolt, hogy először a 2019/116-EFAT „Hajlékony útpályaszerkezetek méretezése talajstabilizációk figyelembevételével” című korábbi FAP anyagot tanulmányozza át, és csak utána foglalkozzon ezzel a munkával. A bonyolult és fáradságos mechanikai számításokat Excel munkafüzetek támogatják, amik ráadásul ingyenesen elérhetőek az Internetről. Ezért a segédlet legnagyobb részében ezen Excel munkafüzetek értő használatához szükséges háttéranyagok dominálnak.

1.1. A forgalom és a pályaszerkezet kapcsolata

A forgalom a járművek abroncsain keresztül adja át terhelését a pályaszerkezetnek. Ennek hatására függőleges igénybevételek (nyomó, ütő, rázó, hajlító, szívó stb.) és a vízszintes erőhatásokból (fékezésből, gyorsításból, koptatásból stb.) származó nyíró igénybevételek jelennek meg (Kosztka 2009). Ezen feszültségek az egyes pályaszerkezeti rétegekben eltérő hatást fejthetnek ki, ilyenek a rugalmas és a plasztikus (maradandó) alakváltozás, a törés és a szerkezeti átrendeződés (Boromisza 1976). Mindezen szerkezeti változások összessége a burkolat felszínén alakváltozásokban jelentkezik, vagyis kialakul az úgynevezett behajlási teknő vagy deformációs vonal.

Szigorúan véve egy jól megtervezett és megépített pályaszerkezet csak rugalmas alakváltozást szenvedhet el a külső kerékterhelés hatására. Ilyenkor a terhelés megszűnése után az eredeti alakjába tér vissza a szerkezet. A valóságban a rugalmas alakváltozás mellett kismértékű maradandó alakváltozással is számolni kell. Ennek mértéke általában a mérési eszközök pontossági határán kívül esik. Ugyanis, ha a maradandó alakváltozás nagysága csupán 0,0001 mm is lenne, akkor 10 000 kerékáthaladás után már 1,0 mm süllyedés mutatkozna a szerkezet felületén, ez viszont a valóságnak nem felel meg (Boromisza 1976). Ezért az esetek többségében a kerékterhelés hatására létrejövő maximális elmozdulást a rugalmas alakváltozás nagyságával egyenértékűnek foghatjuk fel. Ezt az egyszerűsítést igazolja az ismételt terhelések hatására bekövetkező alakváltozások törvényszerűsége is. Az 1. ábrán jól megfigyelhető, hogy ha a kerékterhelés többszörösen terheli a pályaszerkezetet egy adott szelvényben, akkor a gyakorlatban kicsi az a hiba, amely a rugalmas vagy a teljes alakváltozás mérésének különbségéből adódik. Hosszútávon a maradó alakváltozások összegződnek és keréknyom kialakulásához vezethetnek (Boromisza 1976).

A forgalom alatt lévő pályaszerkezet elsősorban hajlító igénybevételt szenved, a hajlításból származó húzófeszültség nagysága pedig a hajlítás minimális sugarától függ. A klasszikus elmélet szerint a tönkremenetel akkor következik be, amikor az alsó aszfaltréteg fokozatosan csökkenő fáradási szilárdsága már a terhelésekből eredő, ismétlődő húzófeszültségek szintje alá süllyed. Ekkor alulról felfelé fáradási repedések indulnak, melyek a burkolat felületére érve fokozatosan kialakuló, összefüggő hálós repedéseket, felületi bomlásokat okozva eredményezik az anyag kifáradását, a tönkremenetelt (Primusz és Tóth 2009). Hagyományosan a burkolat hátralévő élettartalmát a központi behajlás nagysága alapján határozzuk meg. A terhelés tengelyében mért elmozdulás magában foglalja a talaj legfelső rétegének, az ágyazat, az alap és a burkolat függőleges elmozdulásait is. Szigorúan véve a földmű (altalaj) felületén mért behajlás kisebb, mint a szerkezet felszínén.



1. ábra. Mozgó kerékterhelés hatására kialakuló elmozdulások

Az eltérés a pályaszerkezet egyes rétegeinek különböző mértékű összenyomódásaiból tevődik össze (Boromisza 1959). Sok esetben tapasztalható, hogy a mért központi behajlás megengedhető értéke ellenére is rövid idő alatt összeroppedezett a pályaszerkezet felülete. Ennek oka lehet az, hogy a jó minőségű burkolat és az alatta fekvő rétegek között lecsökkent teherbírású réteg helyezkedik el, aminek hatására a kicsi alakváltozás mellett a görbületi sugár is alacsonyra adódik (Boromisza 1976). A fárasztási igénybevételnek kitett burkolat pedig ott fog megrepedni, ahol a hajlítás a legnagyobb mértékű. Fontos tehát tudnunk, hogy azonos behajlás értékek eltérő pályaszerkezet kombinációk mellett is előállhatnak. A példából is látható, hogy a központi behajlás önmagában nem képes egyértelműen eldönteni a burkolat megfelelőségét.

Összefoglalva azt mondhatjuk, hogy a pályaszerkezet fő feladata az, hogy a külső terhelés hatására létrejövő igénybevételeket a földmű felületén egyenletesen elossza, így a viszonylag kis teherbírású földműnek – ezzel együtt magának a pályaszerkezetnek – a káros alakváltozásait megakadályozza (Kosztka 2009). Tönkremenetel szempontjából pedig a hajlítás sugara lesz a döntő, nem pedig a központi behajlás nagysága. Ezért, ha a pályaszerkezetre nézve a kritikus igénybevételt vizsgáljuk, a központi behajlás mérése mellett a hajlított burkolat görbületi sugarát is elemezni kell.

1.2. A teherbírás- és a behajlásmérés kapcsolata

A továbbiakban a pályaszerkezet teherbírásán tehát azt a határigénybevételt értjük, amelynek túllépése után a pályaszerkezetet – vagy annak rétegeit – rendeltetésszerűen már nem lehet tovább használni. A behajlásmérés értékeiből ezen igénybevétel nagyságára lehet következtetni, valamint annak a teherismétlődésnek a számára, amit a pályaszerkezet élettartama végéig elviselni képes. A pályaszerkezet rugalmas alakváltozásának nagysága elsősorban a szerkezet típusától, környezetétől, a terhelés nagyságától és időtartalmától függ. Hazánkban az alkalmazott teher nagyságát 50 kN-ban határozták meg, így az első három paramétert rögzítettnek tekintve a továbbiakban csak a terhelés jellegét vizsgáljuk.

A pályaszerkezetek teherbírásának mérésére az elmúlt 70 esztendőben számos a gyakorlatban is bevált eljárást dolgoztak ki az adott kor műszaki színvonalának megfelelően. Mindegyik eljárás eltérő módon modellezi a forgalom és a pályaszerkezet kapcsolatát. Ennek megfelelően a mért eredmények is kisebb-nagyobb mértékben eltérnek egymástól. Az útpályaszerkezet teherbírását roncsolásmentes alapon jellemző összes berendezés a pálya behajlását méri. Három fő csoportjuk különböztethető meg:

- statikus berendezések (statikus vagy lassan mozgó teher hatására mérik a szerkezet reakcióját),
- vibrációs berendezések (vibrációs vagy ciklikus teher által kiváltott pályaszerkezet-reakciót regisztrálnak),
- impulzusos berendezések (ismert nagyságú tömeg ismert magasságról a pályára ejtése után a pályaszerkezet-reakcióját rögzítik).

Attól függően, hogy a teherbírásmérés közben statikus vagy dinamikus terhelést használunk, beszélhetünk statikus vagy dinamikus vizsgálatokról. A statikus vizsgálatok jellemzője, hogy a terhelő erő nulláról indulva lassan és folyamatosan éri el végső értékét. A terhelés lassú növekedésének megfelelően az alakváltozások is lassan alakulnak ki, így a hő fejlődés mértéke alacsony és – legalábbis elvileg – a terhelés folyamata alatt el is távozik. A vizsgált szerkezet hőmérséklete a terhelés folyamata alatt állandó, tehát a folyamat izotermikus (Szalai 1994).

A dinamikus vizsgálatok legfontosabb jellemzője, hogy a vizsgált szerkezet részecskéi viszonylag kis amplitúdójú, de nagy gyorsulású (általában harmonikus rezgő) mozgást végeznek. Ilyenek a rezonanciafrekvencia vagy a hanghullámok terjedési sebességének mérésével kapcsolatos vizsgálatok. A gyors mozgás – a belső súrlódás révén – hő fejlődéssel jár, melyről feltételezzük, hogy a rövid vizsgálati időtartam alatt nem tud a környezetbe kisugárzódni. A dinamikus vizsgálatok folyamata elvileg tehát adiabatikus. A gyakorlatban a két különböző termodinamikai folyamatból származó

teherbírási paraméterek eltérése elhanyagolható mértékű. Ennél jóval nagyobb eltéréseket eredményeznek a mérési metodikákban rejlő különbségek (Szalai 1994).

A valóságban az elhaladó jármű hatására egy adott keresztmetszetben a terhelés fokozatosan nő, majd csökken. Az alakváltozás a sebesség függvényében a másodperc tört része alatt lezajlik. A pályaszerkezet igénybevétele tehát dinamikai jellegű. A terhelés hatására a pályaszerkezet rezgésbe jön, alakváltozása pedig periodikus és csillapodó jellegű lesz. A kialakuló feszültségek és alakváltozások az időben eltérnek egymáshoz képest, vagyis az alakváltozás késleltetett. A késleltetés okát az anyagok viszkoelasztikus tulajdonságában kell keresni (Boromisza és Abdelaziz 1980). Ha a pályaszerkezetet a rezgések figyelembevételével kívánjuk tárgyalni, olyan fizikai modellt kell létrehoznunk, amely tömeg-rugó-dugattyú rendszerből épül fel. A dinamikus vizsgálatok jellege szerint alapvetően roncsolásos és roncsolásmentes eljárásokat különböztetünk meg attól függően, hogy sor kerül-e a pályaszerkezet anyagának megzavarására. Az előbbieknél a vizsgálat alapelve a fárasztás, az utóbbiaknak pedig a rezgés (Boromisza 1993).

1.2.1.1. Roncsolásos dinamikai vizsgálatok

A fárasztási vizsgálatok lényege, hogy a laboratóriumi próbatestet ismételt terhelésnek vetjük alá, miközben mérjük az átadott erőt és az alakváltozást. A vizsgálat elvégezhető állandó feszültséggel, amelynek hatására a teherismétlődési szám növekedésével az alakváltozás nő (controlled stress), vagy pedig állandó alakváltozással, melynek hatására a teherismétlődési szám növekedésével a feszültség nő (controlled strain). Ugyanazon anyag az előbbi módszernél kisebb élettartam adódik (Boromisza 1993). Jelen dolgozatnak nem tárgya a roncsolásos vizsgálatok ismertetése ezért az érdeklődőknek Ambrus és Bartha (1999) szakkikkét javasoljuk áttekinteni.

1.2.1.2. Roncsolásmentes dinamikai vizsgálatok

A roncsolásmentes vizsgálatok lényege az, hogy a vizsgálandó szerkezetekben rezgést keltünk és az ennek hatására jelentkező fizikai jellemzőket megmérjük. Ezekből – különféle megfontolások útján – a szerkezeti jellemzők már számíthatóak. A rezgések alapvetően harmonikus (vagy kényszer) és szabad (vagy csillapított) rezgések lehetnek. A laboratóriumi technikában inkább az előbbi, az in situ vizsgálatoknál mindkét módszer ismeretes, de inkább az utóbbi a jellemző (Boromisza 1993).

A hullámok terjedési sebességének a vizsgálata területén elsősorban az angol Road Research Laboratory és a francia Ponts et Chaussées laboratóriumok módszerei említhető meg. Könnyű (GOODMAN) vibrátorral a pályaszerkezetben 40 és 60 000 Hz frekvenciájú rezgéseket idéznek elő. A felvevő készülékkel a gerjesztő és a RAYLEIGH- (felszíni saját) hullám fáziseltolódását mérik. Az eredmények alapján felrajzolható a sebesség és a frekvencia közötti összefüggés. Ezzel az eljárással kívánnak tájékozódni

a különböző útpályaszerkezeti anyagok dinamikus tényezőinek az évek során való változásáról (Gáspár 1968).

A rezonancia technikát elsősorban laboratóriumi vizsgálatoknál használják. A vizsgálandó próbatestre rezgéseket adnak át, a próbatest más helyén pedig felfogják ezeket. A frekvencia változtatásával meghatározható a legnagyobb amplitúdót adó rezonancia-frekvencia, amiből a dinamikus E-modulus kiszámítható. A rezonancia-frekvencián alapuló laboratóriumi vizsgálatok azt mutatták, hogy a mérések elég nagy szórással és bizonytalansággal reprodukálhatók, egyrészt a mérőkészülékek szerkezeti hibái, másrészt a mérés végrehajtási módszere miatt. Ezért az E-modulus pontos meghatározására kevésbé alkalmas, inkább relatív összehasonlításra alkalmazható. A rezonancia technika a fázisszög-késés méréssel összekapcsolva alkalmassá tehető útpályaszerkezetek vizsgálatára is.

A harmonikus rezgéskeltésen alapuló vizsgálati módszerek és eszközök eddigi tapasztalatairól azt mondhatjuk, hogy az ilyen módszerrel kapott értékek nehezen lokalizálhatók az útpályaszerkezet egyes rétegeire, másrészt a kapott eredmények erősen eltérőek. Ezért az ilyen módszerekkel meghatározott rugalmassági moduluszt nem lehet egy abszolút érték számszerű megállapítására használni, hanem csak különböző útszakaszok rétegeinek relatív összehasonlítását teszik lehetővé (Boromisza és Abdelaziz 1980). A rugalmassági modulus viszonylag pontos meghatározására alkalmasnak látszanak a csillapított rezgéskeltésen alapuló vizsgálati módszerek. Ezen esetben a rezgéskeltést egy-egy impulzus adja, az impulzusok időtartama pedig a másodperc tört része. Részletesebben a 2.2 pontban tárgyaljuk.

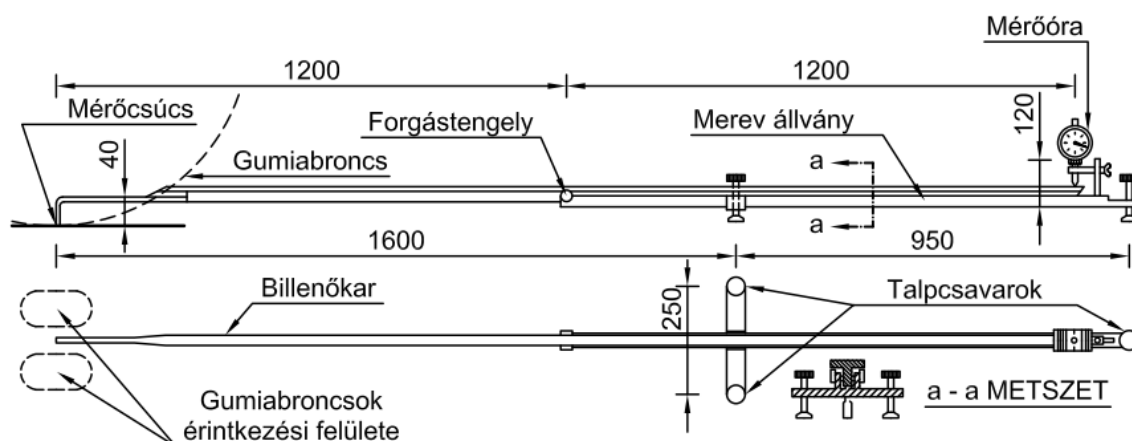
2. Teherbírásmérés

A pályaszerkezetek vizsgálatára széleskörben alkalmazott behajlás alapú módszerek azokat a diagnosztikai eljárásokat foglalják magukba, amelyek a pályaszerkezet rétegeinek merevségét a vizsgált réteg tetején vagy a burkolat felszínén mért alakváltozások alapján határozzák meg ellenőrzött statikus, kvázi statikus, vibrációs vagy impulzus terhelésekre.

2.1. Kvázi statikus teherbírásmérés

2.1.1. Billenőkaros behajlásmérés

Több mint 50 éve jelentek meg az első közlemények arról az egyszerű mérőeszközzől, amelyet A. C. Benkelman tervezett és alkalmazott a kerékterhelés hatására bekövetkező behajlások mérésére. Az egyszerű és olcsó Benkelman-tartót az amerikai WASHO-útkísérletekhez alakították ki az 1950-es években. Azóta világszerte szinte példátlan mértékben elterjedt pályaszerkezetek állapotfelmérésére, kutatásra és erősítéstervezésre (Gáspár 2003). A kifejlesztett módszer szerint a terhelt tehergépkocsi ikerabroncsai közé a maximális behajlás helyén egy a burkolatra támaszkodó vízszintes tengely körül forgó kart kell elhelyezni és a burkolat elmozdulását a kar másik végén mért elmozdulásból lehetséges meghatározni. A mérés közben a terhelő tehergépkocsi álló helyzetben van így a terhelés statikus jellegű (Boromisza 1959). Az eszköz alapelvét a 2. ábra mutatja be.

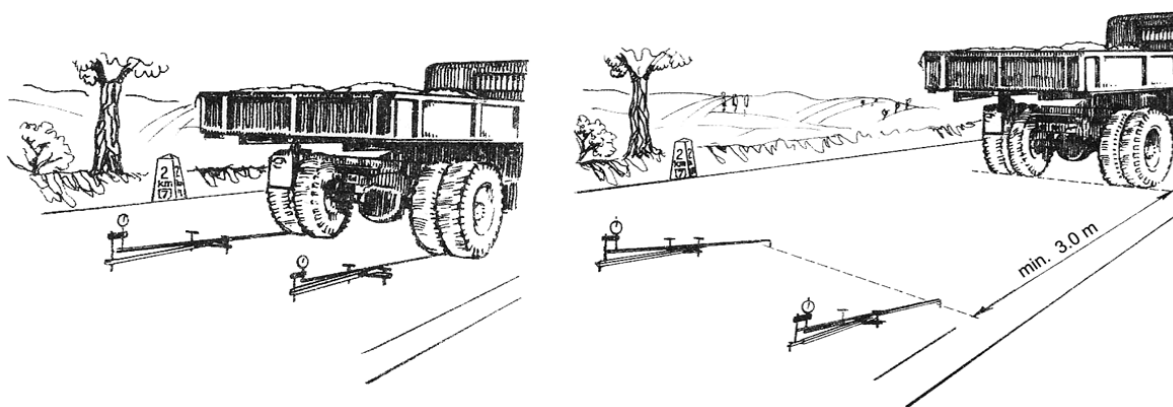


2. ábra. A billenőkaros behajlásmérő (Benkelman-tartó) vázrajza

Eszerint az alumínium vagy faanyagú kerethez erősített kétkarú emelő végét a szabványos terhelésű tehergépkocsi ikerabroncsai közé helyezik. A terhelő jármű elhaladása után mérőórával a burkolatfelület függőleges irányú (rugalmas) mozgását határozzák meg (Gáspár 2003).

2.1.1.1. A mérés végrehajtása

A készülék mérőcsúcsát a vizsgált pályaszerkezeti réteg felületére állított tehergépkocsi ikerabroncsa közé helyezük és leolvassuk a mérőóra állását. A behajlásérték kiszámításának egyszerűsítése érdekében az első leolvasáskor a mérőóra nulla értékre állítható. Ezután a gépkocsit mintegy 3,0 m-rel előre küldjük, és a mérőórát leolvassuk (3. ábra). A két leolvasás értékének különbsége megadja a vizsgált réteg felületén a kerékterhelés hatására előálló függőleges irányú rugalmas alakváltozást (Gáspár 1968). A mérőkart úgy helyezzük a gumiabroncsok közé, hogy azokkal ne érintkezzen. A mérőóra leolvasása előtt meg kell győződni arról, hogy a készülék forgó és elmozduló alkatrészeiben nincs-e szabad mozgást gátló súrlódás. Ez a gyakorlatban a tartóállvány gyenge ütögetésével érhető el, és akkor tekinthető megszűntnek, ha a mérőóra mutatója már nem halad tovább, hanem egy adott érték körül mozog. A mérőórát 1/100 mm pontossággal leolvassuk.



3. ábra. A billenőkaros behajlásmérés elve

A gépkocsi egy percnél hosszabb ideig nem állhat a mérési helyen. A gépkocsi mintegy 3,0 m-rel történő tovább haladása után a mérést megismételjük. Ha két mérés szerinti behajlás különbsége nagyobb a szabványban megadott határértéknél, akkor még egy mérést kell végezni és az átlagot a valószínűtlen érték elhagyásával megállapítani (Gáspár 1968). Ha a mérési szelvények távolsága 25 m-nél kisebb, akkor szelvényenként elegendő egy mérés is.

2.1.1.2. A mérési eredmények értékelése

A behajlás értékét mindig 0,1 mm pontosan és a szabványos 50 kN nagyságú kerékterhelésre vonatkoztatva fejezzük ki. A számításnál a behajlás és a terhelés közötti összefüggést lineárisnak tételezzük fel. Az eredményeket végül hossz-szelvényen ábrázoljuk (Gáspár 1968). A billenőkaros behajlásmérés egyszerű és alacsony költségű, ám lassú és munkaigényes, valamint a behajlási teknő sem mérhető vele.

2.1.2. Automatizál behajlásmérő eszközök

A billenőkaros behajlásmérés eszköz egyik általános korlátja, hogy csak a maximális behajlást lehet vele megmérni (a teljes deformációs vonalat nem), valamint csak meghatározott (diszkrét) helyeken tudunk adatokat gyűjteni. Az akadálytalan adatgyűjtés és a lefedettség növelése érdekében a kutatók elkezdtek egy olyan behajlásmérő kifejlesztését, amely már folyamatos adatgyűjtésre képes. Ennek a törekvésnek a kezdetén még megőrizték a Benkelman-tartó alapelvét, csupán a mérési sebesség növelésére törekedtek, valamint nem csak egy pontban, hanem a teljes behajlási teknőt több pontban mintázva rögzítették azt. Később a behajlásmérő berendezés felkerült a terhelő járműre, így a pálya egy adott pontjának maximális elmozdulását a jármű haladása közben automatikusan tudta regisztrálni.

2.1.2.1. Geobeam és társai

A Geobeam egy automatizált Benkelman-tartó, aminek a fejlesztése az 1980-as években kezdődött (Tonkin&Taylor). A fejlesztés fő célja volt megőrizni a kézi behajlásmérés egyszerű alapelvét úgy, hogy közben a teljes deformációs vonal automatikusan rögzíthetővé váljon minimális költségnövekedés mellett. A mérés alatt a mérőgerenda érzékelője automatikusan rögzíti a függőleges elmozdulást úgy, hogy minden méréshez hozzárendeli a kerékterhelés pozícióját. Így a behajlási teknő megfelelő feldolgozó szoftver segítségével rekonstruálható. A kerékterhelés pozícióját a tehergépkocsihoz kapcsolt mérőkerékkel mérik és rögzítik. A mérőkerék felbontása 10 mm, ami igen sűrű mintavételezést tesz lehetővé. Az FWD készülékekkel ellentétben a Geobeam egy pont függőleges elmozdulását rögzíti eltérő időpillanatokban (Anderson 2009, 20; 2009). A mérőrendszer az 4. ábrán látható. A Geobeam jól használható, reprezentatív mérési eredményeket szolgáltat olyan esetekben is, amikor a vízzel telített földmű miatt az FWD eszközök már nem alkalmazhatóak megbízhatóan (konszolidáció kérdése).

Az EHT Delta roncsolásmentes kísérleti eszköz már lehetővé teszi a behajlási medence háromdimenziós rögzítését. Az eszköz fejlesztése és kivitelezése az IGT (Institute for Geotechnical Engineering, ETH Zürich) közreműködésével történt, részletes ismertetése Rabaiotti (2008) dolgozatában megtalálható. A mérési elv hasonló a Geobeam megoldásához, csak itt az eszköz 11 ponton képes – optikai elven működő – lézertáv mérőkkel észlelni a mozgó jármű haladási irányára merőlegesen kialakuló deformációkat (5. ábra). A mozgó jármű pozícióját pedig nem mérőkerékkel, hanem a visszaverődési időn alapuló lézeres távmérővel határozza meg. Az így nyert adatsorból az egyes időpillanatokhoz tartozó vertikális metszetek a terhelő tehergépkocsi pozíciójának ismeretében háromdimenziós felületté alakítható. Mivel az EHT Delta

eszköz mérete nagy, kezelése pedig bonyolult, egyelőre csak alapkutatáshoz használták fel.

Természetesen a Geobeam mellett még számos más megoldás is létezik a kézi behajlásmérés korszerűsítésére. A teljesség igénye nélkül érdemes megemlíteni a weimari Bauhaus-Universitát Építőmérnöki Karán alkalmazott kézi behajlásmérőt. Ennél a megoldásnál a központi érzékelő csúcs mellett további 3 mérőfejet is elhelyeztek 25–50–80 cm távolságra a terhelés tengelyétől. Az érzékelők által mért elmozdulást a mérőgerendára felszerelt elektronika dolgozza fel és tárolja azokat automatikusan. Ez a megoldás az FWD eszközökhöz hasonlóan egymástól eltérő diszkrét pontokban (4 mért pont) rögzíti az elmozdulásokat. A mérési pontokra illesztett függvény segítségével pedig már a különféle teknőparaméterek számíthatók (Dähnert 2005). Az eszközt a 6. ábra mutatja be.



1. ábra. A Geobeam mérés közben



2. ábra. Az EHT Delta eszköz



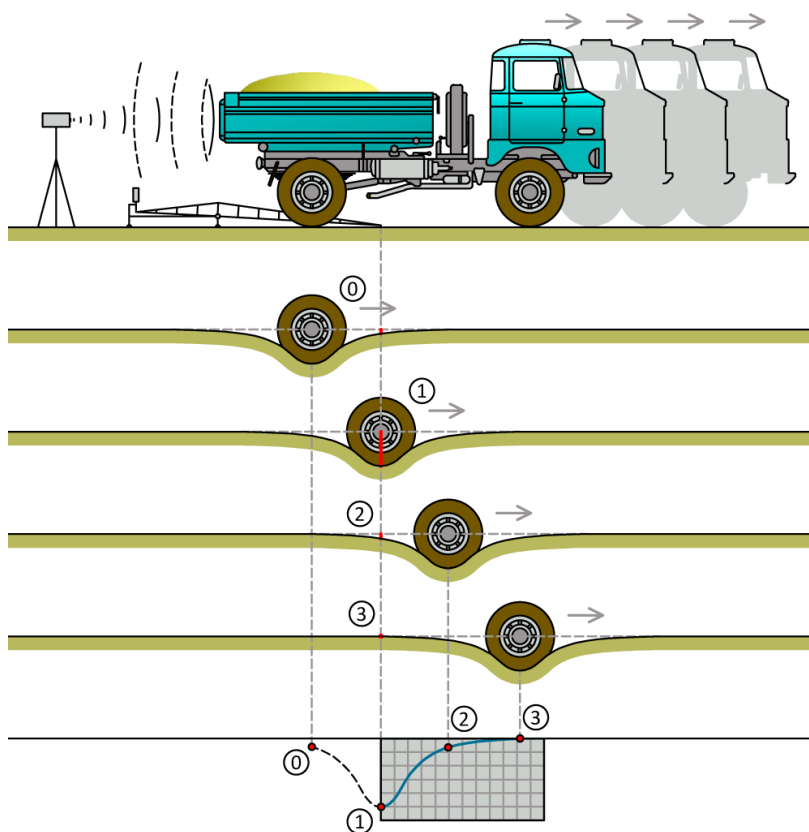
3. ábra. Automatizált Benkelman-tartó, Németország (Dähnert,2005).

A Soproni Egyetemen 2012-ben kidolgozott továbbfejlesztett kézi behajlásmérő alapvetően három pilléren nyugszik (Markó, Primusz, és Péterfalvi 2012; 2013):

- 1.) A hagyományos Benkelman-tartók analóg mérőóráit digitális adatkimenettel rendelkező mérőórákra cserélték.

- 2.) A mérés közben a tehergépkocsi előrehaladását ultrahangos távolságmérővel rögzítik.
- 3.) A digitális szenzorok jelét egy központi vezérlő egység gyűjti, majd továbbítja az adatgyűjtő szoftvert futtató számítógép felé.

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



7. ábra. A továbbfejlesztett kézi behajlásmérés elve

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

Az optikai behajlásmérést először francia mérnökök fejlesztették ki, majd Svájcban Wild-gyártmányú precíziós szintezőműszert alakítottak át erre a célra. Működésének lényege, hogy a mérési ponton fényforrást helyeztek el és annak terhelt, majd terheletlen helyzetét kb. 5 m-re felállított optikai bemérő műszerrel határozták meg. Több fényforrás egyidejű alkalmazása esetén mérhetők a behajlási teknő egyes pontjai. Körülményes használata miatt nem terjedt el széles körben (Gáspár 1968).

2.1.2.2. Lacroix-deflectográf

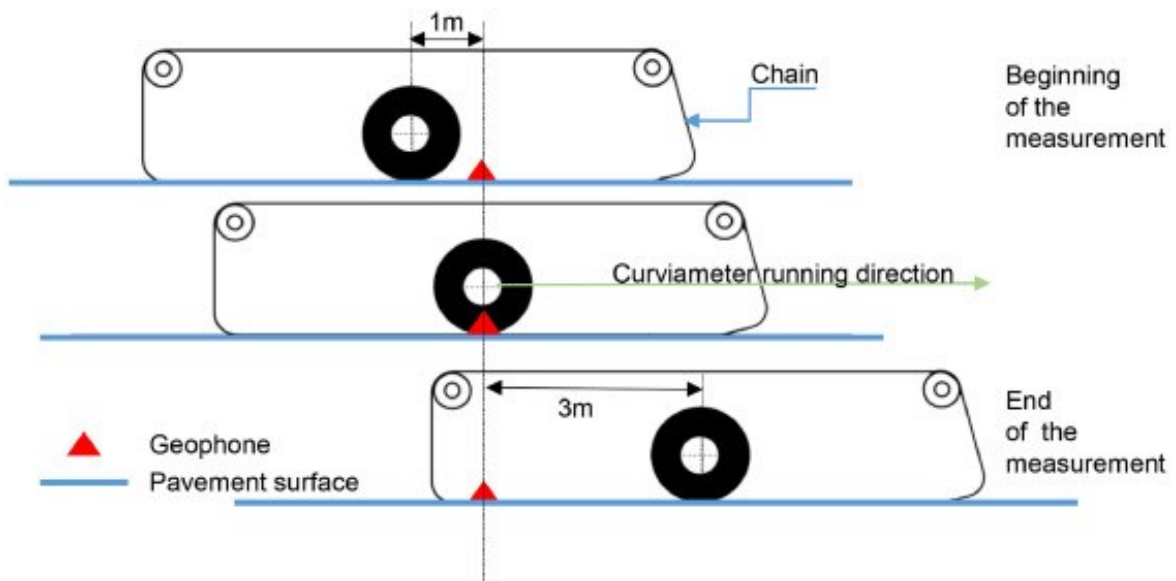
A Lacroix-deflektográf készüléket francia mérnökök fejlesztették ki abból a célból, hogy a pályaszerkezet alakváltozásait – a forgalmat jobban szimuláló – mozgó terhelés alatt tudják rögzíteni (8. ábra). A 3–4 km/h sebességgel közlekedő automatikus mérőkocsi két fő (gépkocsivezető és mérőtechnikus) személyzettel a hátsó ikerkerék abroncsok alatti behajlást 0,02 mm pontossággal, induktív elmozdulásmérővel méri úgy, hogy a kerekek a mérőkocsi alváza alatt elhelyezett, az útburkolaton álló mérőkar felé gördülnek. A legnagyobb behajlás elérése után a mérőkart az elektromechanikus szerkezet 3-4 m-re, a következő mérőpontig tovább csúsztatja, miközben rögzíti a szelvényezési értékeket is. Az eredmények számítógépes feldolgozásra alkalmas adattárolóra kerülnek, de grafikusan is megjeleníthetők. Az automatikus Lacroix-deflektográf mérőberendezéssel végzett munkát egyértelműen kényelmesebbnek, a kapott adatokat úgy meréstechnikailag, mint statisztikailag megbízhatóbbnak kell minősíteni a kézi behajlásmérővel szemben (Kosztka és mtsai. 2008; Kosztka 2009; Baksay 1976).



8. ábra. Lacroix-deflektográf

2.1.2.3. Curviameter

Az első Curviameter berendezést 1977-ben a Francia CEBTP intézményben fejlesztették ki, hajlékony és félmerev útpályaszerkezetek folyamatos teherbírásának mérésére, a haladási sebessége 18 km/h (5 m/s). A behajlásmérést egy 15 méter hosszú, teherautóra szerelt mérőlánccal végzi, amely a rászertelt szenzorokkal együtt a hátsó tengely ikerabroncsai között halad keresztül (9. ábra). Ez érzékelhetően a Lacroix-deflektográf műszaki megoldásának tovább gondolása, ahol a behajlásmérő kar került időről időre a burkolatfelületre (Karoliny 2015).



9. ábra. A Curviameter berendezés mérési elve (Simonin, Boursicaud, és Hornych 2021)

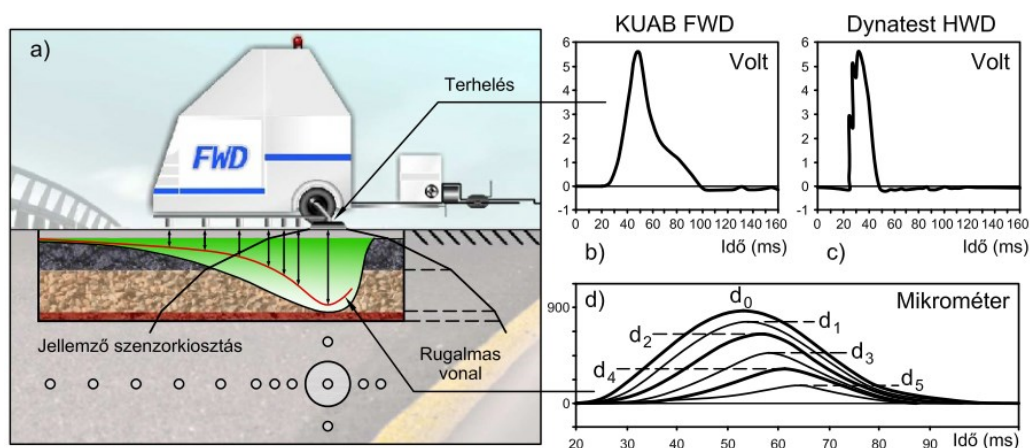
A mérőláncon 3 érzékelő (geophones) helyezkedik el, amely a burkolat elmozdulásának sebességét, valamint gyorsulását rögzíti, a hátsó tengelyt megelőző egy, valamint azt követő három méteren belül. A mérés a kritikus – menetirány szerinti – jobb keréknnyomban történik, a tehergépkocsi mérőtengelyének súlyát 80-130 kN között lehet változtatni. A Curviameter 5 méterenként rögzíti 100 pontban a 4 m hosszúságú behajlási teknőt (10^{-4} pontossággal). A behajlási adatokon túl, a berendezés még gyűjti a levegő és az útburkolat hőmérsékletét, a mérés sebességét, a mérési pozíciót (GPS koordináták) valamint 5 méterenként készít egy kameraképet az útállapotról. A mérési adatok detektálását, illetve tárolását célszoftvert futtató kettő darab számítógép látja el, folyamatos operátori jelenlét mellett (Tímár és Major 2017).

Összehasonlító vizsgálatok alapján a Curviameter által rögzített központi behajlás csupán 2%-kal tér el egy Dynatest 8000 FWD-vel mért értéktől, ugyanakkor a terhelés tengelyétől távolodva a különbségek jelentősen megnőnek (Karoliny 2015).

2.2. Dinamikus behajlásmérés

A csillapított rezgéskeltésen alapuló mérési eljárásokat elsősorban pályaszerkezetek vizsgálatára fejlesztették ki. A rezgéskeltést egy-egy impulzus adja, az impulzusok időtartama a másodperc törtrésze. Többszöri impulzusokeltés esetében ezek egymás közötti időtartama akkora, hogy a keltett rezgések egymást nem befolyásolják (Boromisza 1993). A gyakorlatban az impulzussal operáló behajlásmérő berendezések általában egy lökéscsillapítóval ellátott tárcsára – a helyzeti energia felhasználásával – adott magasságból adott tömeget ejtenek le. Ezzel elérhető, hogy viszonylag kis tömeg mozgatásával akkora nyomás adható át a vizsgált pályaszerkezetre, mint a sokkal nagyobb terhelést igénylő statikus módszerrel. A tömeg, a rugórendszer (gumiütköző csillapítás) és az ejtési magasság egymástól függetlenül állítható, hogy ezáltal a felületre az általunk kívánt terhelést felvihessük.

Az útpályára ható terhelési impulzus rugalmas alakváltozásokból álló, a terhelési centrumból kiinduló „hullámfrontot” eredményez, amely nagyságrendjében és időtartamában hasonló a mozgó nehézgépjárművek kerékterheléséhez. A függőleges elmozdulások maximális értékeit a terhelési lemez közepén, és több, a terhelési centrumtól sugárirányban elhelyezett geofonokkal vagy szeizmométerekkel rögzítik. Ezek a behajlások a terhelési impulzus függvényében jellemzik a felépítmény szerkezeti szilárdságát. Az ezen elven alapuló berendezéseket általánosan ejtősúlyos behajlásmérő (Falling Weight Deflectometer, FWD) eszközöknek nevezik (10.a ábra), amik egyaránt felszerelhetők járműre vagy pótkocsira és számos további érzékelővel is rendelkeznek.



10. ábra. Az FWD készülékek működési elve

A mérés alatt rögzített behajlási teknő lényegesen több információt szolgáltat a pályaszerkezet pillanatnyi állapotáról, mint a központi behajlás, így pontosabban határozható meg annak teherbírása, hátralévő élettartalma és a szükséges erősítőréteg vastagsága. Egy adott pályaszerkezet esetében az alkalmazandó rehabilitációs eljárás kiválasztása igen nagy gazdasági jelentőséggel bír. A pályaszerkezet állapotának

megfelelő ismerete nélküli döntéshozatal igen költséges lehet. Az FWD berendezés által képzett adatok az egyes réteg-vastagságokkal kombinálva igen biztosan alkalmazhatók a burkolat helyszíni rugalmassági modulusának megállapítására. Az így kapott információk sorban felhasználhatók a szerkezeti elemzéshez a teherbírás meghatározására, a hátralévő élettartam becslésére, az erősítő réteg vastagságának meghatározására, amennyiben szükséges (akár az elvárt tervezési élettartamon túl is).

2.2.1. A terhelés és az elmozdulások rögzítése

Az FWD készülék szerkezete részleteiben gyártónként különbözhet. Ez gyakran azt is jelenti, hogy a terhelési impulzus az egyes készüléktípusok esetében eltérő lehet. Az aszfaltréteg (és néha a többi rétegek) merevsége a terhelési sebességtől függ, így a felépítmény reakciója függ a teherimpulzus típusától. Egy jármű terhelési impulzusának szimulálásánál azt a terhelési időt kell figyelembe venni, ami megközelítően megfelel egy gördülő kerék terhelési idejének. A legtöbb FWD készülék esetében az impulzus kezdetétől a maximális érték eléréséig 5–30 ms telik el, és a terhelési impulzus időtartama pedig 20–60 ms (10.b-c ábra). Fontos kiemelni, hogy normális esetben a terhelés időben változó grafikonja nem szimmetrikus lefutású, ezért a terhelés teljes időtartama (szélessége) nem alkalmas az FWD készülékek jellemzésére. Helyette célszerűbb a kiindulási állapot és a maximális impulzus közötti időtartamot, azaz az ébredési időt (rise time) alkalmazni (Shahin 2005). Az FWD berendezések kb. 30 ms idő alatti méréseikkel az útpálya teherbírását közelítő módon tudják csak jellemezni, mivel az egymástól bizonyos távolságokban fekvő geofonok mindig a helyi maximális behajlásokat regisztrálják, amelyek azonban nem pontosan azonos időben, hanem a sebesség szerint eltolódott időpillanatokban keletkeznek (10.d ábra). Az ebből fakadó hiba minimalizálható, ha a teherimpulzus felfutó ágát az időben megnyújtjuk. A nagyobb ébredési idő – a szenzorok maximális elmozdulásai között – kisebb időeltérést fog eredményezni (Shahin 2005). Az ejtősúlyos készülék terhelési idejét dinamikus frekvenciára átszámítva, csak 30-60 Hz frekvencia körüli értékeket lehet kapni, amely értékek növelése tovább már csak nehézkesen oldható meg. Fontos tehát figyelembe venni a teherimpulzus alakját és az ébredési idő hosszát, mivel ennek függvényében a maximális elmozdulások értéke akár 10-20%-os eltérés is mutathatnak FWD típusonként. A behajlási teknő alakjának meghatározásához szükséges, hogy az FWD készülék megfelelő számú behajlás-érzékelővel rendelkezzen. A behajlás-érzékelőknek az FWD készülékek körében két típusa létezik, a geofon és a szeizmométer. Az alkalmazott érzékelő típusa az adott FWD készüléktől függ. Vékony aszfaltréteget tartalmazó felépítményeknél a behajlás érzékelőknek a terhelési centrumhoz közelebb kell lenniük, mint vastagabb aszfalt rétegeket tartalmazó felépítmények esetében.

2.2.2. A mérési adatok információ tartalma

Az ejtősúlyos behajlásmérő berendezés mérési eredményét kiegészítve a pályaszerkezet felépítésének adataival (rétegek típusa és vastagsága), alkalmazható valamilyen „backcalculation” eljárás, amivel a pályaszerkezeti rétegek teherbírási modulusát a mérési adatokból vissza lehet számolni.

A visszszámoláson alapuló eljárások általában a többrétegű pályaszerkezetekre kidolgozott mechanikai számítási módszereket alkalmazva, az ismert adatokból kiindulva, iterációs eljárással határozzák meg a mért lehajlávonalat legjobban megközelítő pályaszerkezeti jellemzőket. A módszer egyik fő hátránya, hogy a szerkezetből fúrással szükséges mintát venni a rétegfelépítés meghatározásához (Ambrus 2001).

Az FWD adatok másik feldolgozási lehetősége a behajlási teknőparaméterek alkalmazása. Ez azon a megfigyelésen alapul, hogy a terhelési tengelytől jellegzetes távolságra mért elmozdulások különbsége közvetlenül jellemzi az adott mélységi tartományban lévő szerkezeti rétegek merevségét. Az aszfaltburkolatok jellemzésére a felszíni görbületi indexe (Surface Curvature Index, SCI) terjedt el, amit a terheléshez közeli $D_0 - D_{300}$ elmozdulásokból számítunk. Az alaprétegek szerkezeti jellemzésére az alap károsodási index (Base Damage Index, BDI) használatos, ami a $D_{300} - D_{600}$ behajlások különbsége. Az alap görbületi indexek (Base Curvature Indices, BCI) jól használhatóak ($D_{600} - D_{900}$) az alap alatti rétegek és a teherhordó altalaj elemzésére. Az SCI, BDI és BCI indexek növekedése az adott rétegcsoporthoz gyengülésére utal (Tóth és Tóth 2008).

2.2.3. A KUAB készülék

A svéd KUAB ejtősúlyos készülék (11. ábra) vontatott rendszerű, működtetése a vontató járműben elhelyezett irányítópulttal történik. A mérőeszköz a nagyméretű fémburkolat alatt helyezkedik el, az egység alján lévő ajtó automatikusan kinyílik, hogy a mérőberendezést az útburkolat felületére leereszthessék. Ez a megoldás a mechanikus és elektronikus elemeket védi a víz, az olaj, a por és egyéb hatástól. Az 50-es jelű modell 12-50 kN, míg a 150-es jelű 12-150 kN nagyságú impulzus előállítására képes. A behajlást legalább két ponton (a teherátadás tengelyében és attól meghatározott távolságban) mérik, szeizmométerrel (rezgésmérő). A rezgésmérőket a helyszínen, a berendezésbe beépített mikrométerekkel kalibrálják. Kéttömeges rendszer közvetítésével terhelik a burkolatot. Ily módon más FWD modelleknél hosszabb impulzusidőt érnek el (szélessége 50–60 ms közötti), amely a tehergépkocsik által a közúti forgalomban keltett feszültségek időbeli lefolyását jobban megközelíti.

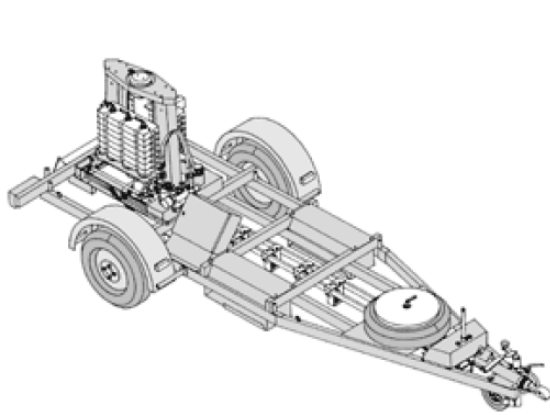


11. ábra. *Falling Weight Deflectometer, Kuab modell (<https://ceer.iastate.edu/kuab-falling-weight-deflectometer/>)*

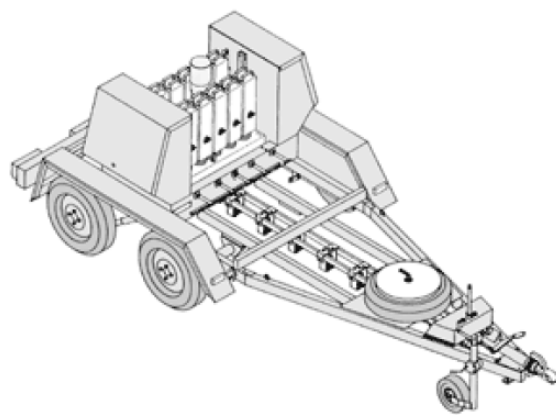
A terhelőtárcsát több elemből állítják össze, hogy így még nagyobb felületen érintkezhessen a burkolattal. A tárcsa átmérője: 30 cm (hajlékony) és 45 cm (merev) lehet. A hazai vizsgálatok alkalmával az elmozdulásokat – egy mérési vonalon – a terhelés tengelyében hat, egymástól 200 mm-re lévő ponton mérték. Lehetőség van a szeizmométer különböző távolságokban való elhelyezésére, ezáltal a görbületi vonal felvételére is. A berendezés méri a levegő és a burkolat hőmérsékletét is. A dinamikus teherbírásmérés hazai alkalmazását megalapozó adaptációs vizsgálatok 1991-ben kezdődtek meg. Ezek alapján megállapítható, hogy a mérési eljárás gyors, szubjektivitástól mentes. A berendezés mozgékonyaságánál fogva nagyszámú mérés elvégzésére alkalmas. 1993-tól hazánkban 4 db KUAB típusú FWD végzi az országos közúthálózat pályaszerkezet-teherbírási hálózati és létesítményi szintű jellemzését (Boromisza 1997).

2.2.4. A Dynatest készülék

A dán fejlesztésű Dynatest ejtő súlyos teherbírásmérő berendezés egy igen pontos, megbízható és folyamatosan fejlesztett eszköz a behajlásmérések elvégzésére. A Dynatest cég komplex FWD technológiája megoldást kínál az analitikus-empirikus pályaszerkezet számítások elvégzéséhez, az automatikus pályaszerkezet állapotértékeléshez és a mérnöki menedzsment rendszerek alkalmazásához is. Az alkalmazott terhelő erő széles határok között, a pályaszerkezet függvényében (szerkezeti rétegek merevsége, felépítése) változtatható. Ennek megfelelően két típus különíthető el: a Dynatest 8000-es modell (12.a ábra) inkább közutakra és hajlékony pályaszerkezetekre lett kifejlesztve, így a terhelő erő nagysága 7 kN és 120 kN között helyezkedik el, míg a Dynatest 8081/8082-es modell (Heavy Weight Deflectometer, HWD) repülőterek és beton burkolatok mérését szolgálja a 30-240 kN közötti terhelésével (12.b ábra).



a) Dynatest 8000 FWD Modell



b) Dynatest 8082 HWD Modell

4. ábra. A Dynatest cég FWD berendezései

A HWD ugyanazt a vizsgálati és adatelemzési eljárást követi, mint az FWD, de képes nagyobb terhelési kapacitás alkalmazására, mint pl. a Boeing 747 nehéz terhelésének szimulálására. A jellemző terhelési idő 25-30 ms. A terhelés kezdete és a csúcspont közötti minimális idő 10-15 ms minden teheresetben. Kétféle tárcsa alkalmazható, a hajlékony (szegmentált) átmérője 30 cm, míg a merev tárcsa átmérője 45 cm (Shahin 2005). A mérés megbízható és gyors (akár 60 mérési pont/óra). Felépítését tekintve a következő érzékelőkkel van ellátva: 9-15 db behajlásmérő (geofon), melyek a terhelés középpontjától egészen 2,4 m-es távolságig állíthatók, lehetőség van laterális szenzorkiosztásra is. A terhelés pontos értékét egy darab tárcsa alatti erőmérő cella rögzíti minden ejtés után. Infravörös hőmérsékletmérő szenzor méri a felületi hőmérsékletet, mellette pedig rögzítik a levegő hőmérsékletét is. Tartalmaz távolságmérő egységet, valamint a mérési pontok megjelölését szolgáló eszközöket is. Opcionálisan ellátható videó és GPS rendszerrel (Shahin 2005).

2.2.5. A Jils készülék

Az amerikai fejlesztésű Jils sokban hasonlít az eddig bemutatott FWD készülékekhez. A terhelő erő nagysága itt 10 kN és 125 kN között változhat, a terhelési idő jellemzően 20-35 ms. Ugyancsak fel van szerelve hőmérsékletmérő szenzorokkal, a terhelést egy 30 cm átmérőjű tárcsán át közvetíti a terhelt szerkezetre és a kialakult deformációkat pedig 9 db geofonnal rögzíti. A dinamikus terhelést erőmérő cellával minden mérés után eltárolja. A Jils mérőeszközt a 13. ábra mutatja.

2.2.6. A könnyűsúlyú behajlásmérők

A könnyűsúlyú behajlásmérő (Light Weight Deflectometer, LWD) az FWD mérőrendszer hordozható változata (14. ábra). Az LWD főként nem kötött, szemcsés pályaszerkezeti anyagok vizsgálatára lett kifejlesztve. Az FWD-hez képest az LWD-nek kis mélységű hatása van, mivel a könnyebb (20 kg-nál kisebb) ejtő súlyt kézzel emelik fel. Ez a módszer ideális egyrétegű útpályaszerkezetek értékeléshez.



13. ábra. Falling Weight Deflectometer, Jils modell



14. ábra. A könnyűsúlyú behajlásmérők

2.3. Teherbírásmérő berendezések összehasonlítása

A fejezetben ismertetett mérési módszerek közül a világon a legelterjedtebb és a leggyakrabban alkalmazott a kézi behajlásmérés (a Benkelman-gerenda) volt, így számos útkísérlet eredményei és műszaki előírás tartalma is az ilyen módon meghatározott behajlásértékekre vonatkoztak és vonatkoznak még ma is. Ezért az eltérő mérési módszerek átszámításának igénye hamar felmerült és máig fennmaradt.

1975-ben jelentek meg a Lacroix-mérőkocsik, majd 1993-tól kezdődött a KUAB típusú FWD készülékek alkalmazása a magyar közúthálózat állapotértékelésében. A legújabb mérőeszköz a hazai gyakorlatban a 2015-ben bemutatkozó Curviameter. A Magyarországon előforduló mérőeszközök főbb jellemzőit az 1. táblázatban közöljük. Látható, hogy a berendezések műszaki paraméterei jelentősen eltérnek, ezért univerzális átszámításra csak akkor van lehetőség a behajlásértékek között, ha a kerékterhelés sebességét, azaz a terhelési időt és annak lefutását a lehető legpontosabban figyelembe vesszük. Ezt pedig csak mechanikai modellekkel lehetséges, empirikus tapasztalati függvényekkel nem.

1. táblázat. Behajlásmérő eszközök összehasonlítása

Jellemzők	Benkelman	Lacroix	FWD	Curviameter
Eszközigény	tehergépkocsi 2 db gerenda	mérőkocsi	mérőkocsi	mérőkocsi
Személyzet	4 fő	2 fő	2 fő	2 fő
Igénybevétel	kvázi statikus	kvázi statikus	dinamikus	kvázi statikus
Szimulált sebesség	4 km/h	4 km/h	80 km/h	18 km/h
Mérés módja	diszkrét	folyamatos	diszkrét	folyamatos
Mérés sűrűsége	25 m	4 m	25 m	5 m
Napi teljesítmény	15 km	20 km	15 km	25-35 km
Mért paraméter	központi behajlás	központi behajlás	behajlási teknő	behajlási teknő
Adatok rögzítése	manuális	automatikus	automatikus	automatikus
Ismételhetőség	kielégítő	kiváló	kiváló	kiváló
Eszköz költsége	olcsó	drága	drága	drága

3. Teherbírásadatok értelmezése

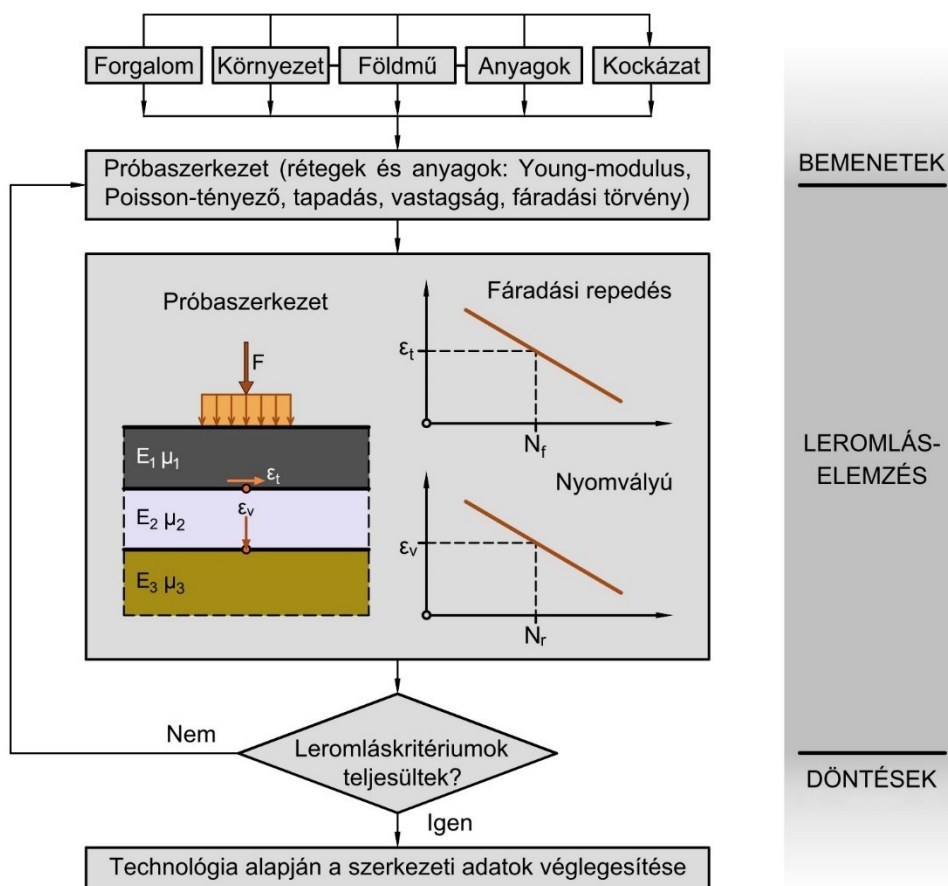
3.1. A mechanikai-empirikus méretezési módszer áttekintése

A mechanikai-empirikus (M-E) útpályaszerkezet méretezés elve nagyon egyszerű, megegyezik bármely más tartószerkezet méretezési gyakorlatával. A külső kerékterhelés következtében ébredő kritikus igénybevételeket összevetjük azokkal a határ-igénybevételekkel, amelyeket még a szerkezeti rétegek az anyagi tulajdonságaikból adódóan elviselni képesek. Ez a gondolatmenet jól megfelel az általános építőmérnöki gyakorlat acél- és vasbeton szerkezeteknél megszokott méretezési gondolatmenetének, ugyanakkor útpályaszerkezeteknél a valóságos anyag viselkedése és a rugalmasságtani modell erősen eltér egymástól. A határ-igénybevételeket a forgalom függvényében legtöbbször laboratóriumban vagy kísérleti útszakaszokon végzett hosszú távú megfigyelések alapján felállított empirikus teljesítményegyenletekkel, ún. leromlási modellekkel vesszük számításba. Főleg ez az oka, hogy a mechanikai alapon álló módszerek is sok empirikus részletet tartalmaznak, és így szemiempirikusnak vagy mechanikai-empirikusnak tekinthetők.

A mechanikai-empirikus (M-E) útpályaszerkezet-méretezés általános munkamenete a következőképpen foglalható össze Nemesdy (1977) szerint:

- 4.) Meghatározandók a legfontosabb kiindulási adatok:
 - a. a tervezési időtartam (az útpályaszerkezet élettartama),
 - b. a tervezési forgalom (az élettartam alatt lefutó nehéz teherjárművek egységtengelyekre átszámított áthaladási száma),
 - c. a tervezési földműteherbírás a talajvizsgálati jelentés alapján,
 - d. a tervezési klimatikus jellemzők, pl. a hőmérséklet és a csapadék átlagos értékeinek feltárása az anyagjellemzők reális megválasztásához.
- 5.) Előzetes útpályaszerkezet összeállítás az adott forgalomnak és földműteherbírásnak megfelelően.
- 6.) A rugalmasságtan alapján kiszámítjuk a kerékterhelés hatására a többrétegű rendszerben ébredő kritikus feszültségeket, alakváltozásokat és elmozdulásokat.
- 7.) Ellenőrzés határ-igénybevételekkel az egyes méretezési kritériumok szerint. A határ-igénybevételek számszerű nagysága anyagfajtánként külön-külön vizsgálva általában az egység-tengelyáthaladási számnak függvénye.
- 8.) Az útépitési technológia alapján a szerkezeti adatok véglegesítése.

A mechanikai-empirikus méretezési rendszer munkamenetének lépéseit grafikusan a 15. ábra mutatja be.



15. ábra. Az M-E méretezési rendszer folyamatábrája

A többrétegű útpályaszerkezetek modellek pontos mechanikai megoldása nem egyszerű feladat. A számítást kézzel elvégezni rendkívül körülményes, ezért mára az egyik legelterjedtebb és legmegbízhatóbb módja a feladat végrehajtásának a programok alkalmazása lett. A rendelkezésre álló szoftverek egy része fizetős (pl. BISAR, CIRCLY), egy másik része szabadon felhasználható (pl. WESLEA). Bármelyik megoldást is választjuk, mindig nagy nehézséget okoz, hogy az igényeinkhez igazítsuk az alkalmazást. Mindazonáltal erre a problémára is született megoldás. Az [OpenPave.org](https://openpave.org) weboldalon mindenki számára ingyenesen elérhető az a matematikai apparátus, ami a mechanikai számításokhoz szükséges. A programozásban nem jártas mérnökök számára általános EXCEL táblázatkezelő ismeret szintjére egyszerűsödik a feladat. Hasonlóan felhasználóbarát megoldást nyújt Levenberg (2016a) ELLEA1 MS Excel munkalapja: https://orbit.dtu.dk/files/171271124/ELLEA1_ver0.96_1_xlsb

A programmal a valóságos többrétegű útpályaszerkezetet három-, négy- vagy ötrétegű rugalmas rendszerrel helyettesítjük, és a választott rétegek anyagának megfelelően felvesszük a mértékadó E rugalmassági modulusokat, valamint μ Poisson-tényezőket, valamint azok geometriai vastagságát. Az ELLEA1 munkafüzet a tehergépkocsik ikerabroncs terhelése is modellezhető, mivel a külső kerékterhelést két körtárcsán egyenletesen megoszló erőrendszerrel modellezi (16. ábra).

Layer	Modulus	Poisson	Thickness		
1	5 000	0.35	150.0		
2	500	0.35	200.0		
3	200	0.35	400.0		
4	100	0.40	1000.0		
5	80	0.40	semi-inf		

Load#	Stress	Radius	X	Y
1	1.10	120.00	0.00	-150.00
2	1.10	135.00	0.00	150.00

Evaluation Point	x	y	z	Layer=
	500.00	0.00	150.00	1

Direction	Stress	Strain (microstrains)	Displacement
X	1.94E-01	46	2.48E-02
Y	-1.29E-01	-41	-8.65E-04
Z	2.42E-02	0	5.07E-01
YZ	-1.86E-03	-1	
XZ	5.28E-02	14	
XY	-1.22E-02	-3	

ELLEA₁ (ver. 0.96) computes stresses, strains and displacements in a layered elastic half-space due to two uniformly loaded (dissimilar) circular areas. Five fully bonded weightless, homogeneous, and isotropic layers are considered. Developed under JTRP Project 2813 by Dr. Eyal Levenberg, North Central Superpave Center, Purdue University, November 2008 (January 2016 update). For questions, requests, and comments contact: eyal.levenberg@yahoo.com.

Sign convention:

16.. ábra. Az ELLEA1 MS Excel munkalap grafikus felülete

Az ELLEA1 program használatát a szerző [YouTube videóban](#) mutatja be, ezért erre itt most részletesebben nem térünk ki. Az M-E méretezési rendszerről, valamint az ingyenesen elérhető WESLEA programról további részleteket talál az érdeklődő Olvasó a 2019/116-EFAT „Hajlékony útpályaszerkezetek méretezése talajstabilizációk figyelembevételével” című korábbi FAP anyagban.

3.2. Anyagtulajdonságok visszaszámítása

A teherbírásmérő berendezések adataiból történő anyagparaméter becslés egy inverz problémaként fogható fel, aminek a célja a rendszer jellemzőinek (pl. rétegmodulus) meghatározása az ismert bemenetekből (pl. terhelés) és kimenetekből (pl. mért behajlás). A pályaszerkezet tervezők körében a hasonló inverz problémákat egy visszaszámításnak (back-calculation) nevezett módszerrel szokás megoldani. Az eljárás lényege, hogy a visszaszámítás alatt a mért felületi alakváltozást megpróbáljuk (bizonyos tűrhető hibán belül) összehasonlítani egy azonos felépítésű útpályaszerkezet modell feltételezett rétegmerevségeinek (modulusainak) felhasználásával számított felületi alakváltozásával. Az útpályaszerkezet modellben a feltételezett rétegmodulusokat addig iteráljuk, amíg olyan felületi behajlást nem kapunk, amely nagymértékben megegyezik a mérttel. A feltételezett rétegmerevségek azon kombinációját, amely ezt az egyezést eredményezi, a különböző útpályaszerkezetrétegek tényleges, helyszíni modulusaihoz közelítő értékének tekintjük. A visszaszámítási folyamat általában iteratív, és számítógépes szoftverrel történik. A leírtak alapján minden visszaszámítási eljárás két nélkülözhetetlen összetevőből áll:

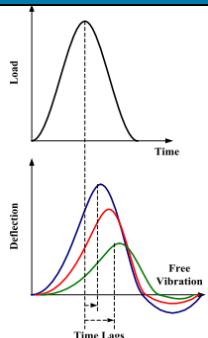
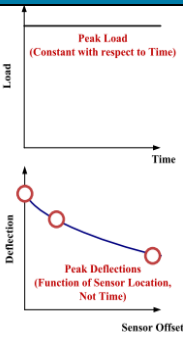
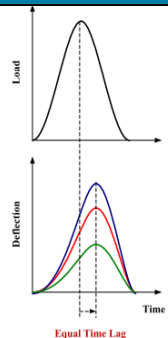
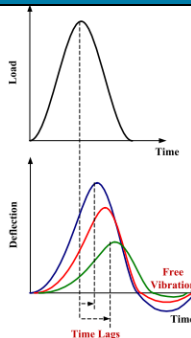
- 1.) Elméleti, mechanisztikus modell, ami képes a terhelés-behajlás értékek szimulációjára (pl. ELLEA1).
- 2.) Iteratív, vagy statisztikai eljárás, amely képes az optimális réteg paraméterek meghatározására a mért és szimulált értékek közti eltérés minimalizálásával.

A réteg modulus számítására az egyenes és iteratív megoldások sokféle kombinációját dolgozták már ki. Olyannyira, hogy gyakorlatilag lehetetlen felsorolni e visszaszámítási módszerek összes jellemzőjét. Mindemellett érdemes megjegyezni, hogy az elméleti, mechanisztikus modell feltételezései és jellemzői alapján ezek a módszerek három fő csoportba sorolhatók (H. Lee 2022):

- a.) statikus
- b.) dinamikus
- c.) viszkoelasztikus

A három mechanikai modell jellemzőit a 2. táblázat mutatja be. A statikus útpályaszerkezet modell visszaszámításnál azzal a feltételezéssel élünk, hogy a pályaszerkezet a terhelés alatt statikus egyensúlyi állapotban van (pl. az eltelt időtől független a folyamat). Ennek eredményeképp ezek a modellek nem teszik lehetővé az anyag időtől függő viselkedésének figyelembevételét.

2. táblázat. Mechanikai modellek jellemzői (statikus, viszkoelasztikus és dinamikus)

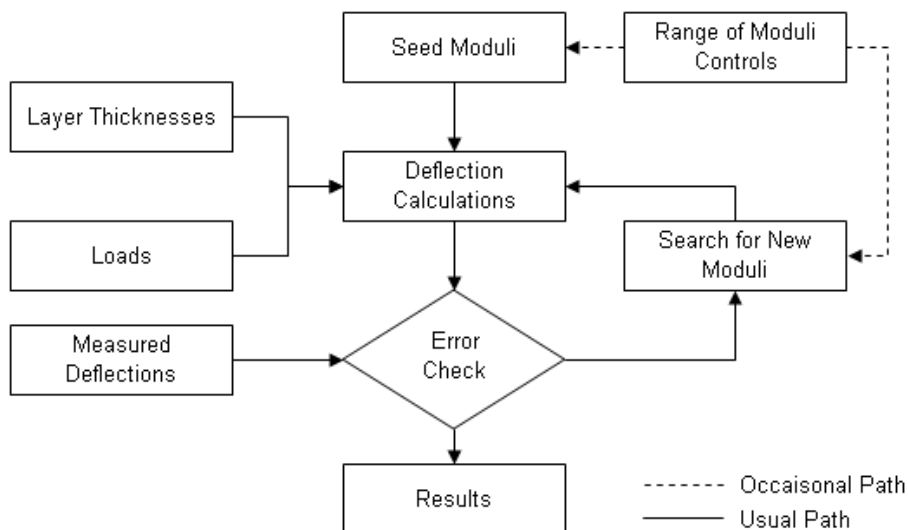
Jellemző	Mért FWD adatok	Statikus	Viszkoelasztikus	Dinamikus
Séma				
Hatékonyság	Nem értelmezhető	Nagyon hatékony	Hatékony	Nem hatékony
Anyag időfüggése	Megjelenik a viszkoelasztikus anyagmodell miatt	X	✓	✓
Dinamikus hatások	Megjelenik az ejtő súly miatt	X	X	✓
Behajlások kérésése	Minden szenzorra különböző	X	Minden szenzorra egyforma	✓
Szabad rezgés	Megjelenik a pályaszerkezettől függően	X	X	✓

Bár a statikus modellek nagyon hatékonyak, az FWD mérés dinamikus jellegét (időtől függ, impulzusszerű terhelés) nem képesek kezelni. A lineárisan rugalmas anyagokkal ellentétben a viszkoelasztikus anyagok az időtől függő reakciót mutatnak, még statikus (vagy állandó) terhelés alatt is. Mindazonáltal, ahogy azt Kutay, Chatti, és Lei (2011) kimutatta, a viszkoelasztikus modellek nem veszik figyelembe a hirtelen becsapódó terhelés (pl. ejtőszúly) által keltett hullámok terjedésének hatását. Ennek megfelelően nem képesek modellezni az FWD berendezések egyes érzékelőin eltérő időben megjelenő változásokat, sem a pályaszerkezet szabad rezgését, ami pedig jelentős is lehet a pályaszerkezeti és a környezeti feltételektől függően. A dinamikus visszaszámítási módszerekben alkalmazott modellek jellemzően a rugalmas hullámterjedés elméletéből származó megoldásokon alapulnak. Ezért ezek a megoldások természetüktől fogva tartalmazzák a feszültség-hullám terjedését, és így realisabb pályaszerkezet reakciókat adnak, amelyek jobb összhangban vannak az FWD berendezések által mért értékekkel.

A visszaszámítási eljárást alapjait legjobban a statikus modellen lehet elsajátítani, ezért mi is ezt fejtjük ki most bővebben. Az alapelveket aztán jól lehet hasznosítani a másik két csoportnál is, hiszen csak az alapmodellek felépítése tér el a statikustól.

3.2.1. A módszer fő lépései

A 16. ábra egy egyszerű folyamatábrára (Lytton 1989), amely az összes ismert statikus visszaszámítási program lényeges elemét tartalmazza.



16. ábra. Visszaszámítási folyamatábra

A **mért behajlások** (Measured Deflections) alatt a burkolatfelületen mért alakváltozásokat és a terheléshez tartozó távolságokat értjük. A **rétegvastagságok és terhelések** (Layer Thickness & Loads) tartalmazzák az összes rétegvastagságot és terhelési értéket egy adott vizsgálati helyhez. **Kezdőértékeknek** (Seed Moduli)

nevezzük azokat a kiindulási modulusokat, amelyeket a számítógépes program a felszíni alakváltozások kiszámításához használ. Ezeket a modulusokat általában korábbi tapasztalatok vagy különböző egyenletek alapján becsüljük meg. A **behajlások számítása** (Deflection Calculations) a felszíni deformációs teknő kiszámítását jelenti számítógépes programmal. A **hibaellenőrzés** (Error Check) lépésben összehasonlítjuk a mért és a számított behajlási teknőket. Különböző hibamértékek használhatók az ilyen összehasonlítások elvégzésére (erről bővebben a következő bekezdésében). Az **új modulusok keresése** (Search for New Moduli) részben a különböző visszaszámító programok eltérő módszereket alkalmaznak a rétegmodulusok olyan közelítésre, amely már elfogadható hibát eredményez a mért és a számított behajlások között. A modulusok tartományának korlátozása (Range of Moduli Controls) lehetővé teszi egyes visszaszámító programokban, hogy rögzítsük a minimum és maximum értékeket, ezzel megakadályozva az ésszerűtlen (magas vagy alacsony) modulusokhoz történő konvergenciát.

3.2.2. Az iterációs hiba mérése

Az iteratív visszaszámítási folyamatot a mért és a számított alakváltozások közötti átlagos négyzetes hiba gyöke (Root Mean Square Error, RMSE) szabályozza. Az RMSE kiszámítható az alakváltozások relatív különbségeiből az alábbiak szerint:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left[\frac{1}{n} \left(\frac{d_j - w_j}{d_j} \right)^2 \right]} \quad (1)$$

ahol d_j a j . érzékelőnél mért alakváltozás ($j = 1, \dots, n$ = az érzékelők száma), és w_j a számított behajlás a j . érzékelőnél. A gyakorlatban általában az RMSE megfelelő tartománya 1–2 százalék.

3.2.3. Visszaszámítás az ELLEA1 Excel munkafüzettel

A statikus visszaszámítás könnyedén megvalósítható az ELLEA1 Excel munkafüzettel, hiszen a direkt modell a rendelkezésünkre áll. A visszaszámítás iteratív részét ugyancsak biztosítja az Excel az Adatok\Solver funkcióval. A Solver bővítménnyel egy adott célértékcellában lévő képlet optimális (minimális vagy maximális) értékét kereshetjük meg, úgy, hogy közben korlátozhatjuk a munkalapon szereplő többi képletcella értékét. Az ELLEA1 munkafüzettel adott x távolságra ki tudjuk számítani a behajlást, a többi eredményt pedig az Excel Adatok\Lehetőségelemzés\Adattábla... funkciója szolgáltatja. A folyamat részletesen megtekinthető egy [YouTube videóban](#).

3.3. Az aszfaltkeverékek viszkoelasztikus jellemzése

Az útpályaszerkezetekkel foglalkozó mérnököknek közismert, hogy az aszfaltkeverékek viselkedése a terhelés jellegétől és a vizsgálati hőmérséklettől alapvetően függ. Ennek köszönhetően a keverékek élettartamuk jelentős részében viszkoelasztikus anyagnak tekinthetők, azaz a viszkózus és rugalmas tulajdonságok egyidejű jelenléte kimutatható, ami jelentősen megnehezíti nemcsak az aszfalt-pályaszerkezetek méretezését, de a keverékek vizsgálatát is. Méretezéskor a klasszikus teherhordó szerkezetek építőanyagait rugalmas viselkedésűnek tekintjük. A rugalmas anyagokra a Hooke-törvény érvényes, amit kifejez a $\sigma = E \cdot \varepsilon$ összefüggés. Az arányossági tényező itt az állandónak feltételezett E rugalmassági modulus. Ez az anyagjellemző teremt kapcsolatot a feszültségek és alakváltozások között. Az aszfaltok azonban már közepes (5–15°C), de különösen magasabb (> 40°C) hőmérsékleten lényegesen eltérnek ettől a feltételezett rugalmas viselkedéstől:

1. a merevség nem állandó, hanem a hőmérsékletnek és a terhelési időnek a függvénye;
2. állandó feszültség hatására a fajlagos alakváltozás időben növekszik (kúszás);
3. állandó fajlagos alakváltozás mellett a feszültség időben csökken (relaxáció);
4. ciklikus feszültségváltozás hatására hiszterézis jelentkezik, ami a mechanikai energia disszipációjával jár.

Ezeket a tulajdonságokat a kötőanyag (a bitumen) örökíti át az aszfaltkeverékre, ezért indokolt most röviden megismerkednünk a lineárisan viszkoelasztikus anyagok legfontosabb jellemzőivel.

3.3.1. Idő- és frekvenciafüggő viselkedés

3.3.1.1. Kúszás

Aszfaltanyagok kúszás vizsgálatánál ugrásszerű σ_0 feszültséggerjesztést alkalmazunk. Válaszjellemzőként a próbatest két vége között mérhető $\varepsilon(t)$ nyúlást rögzítjük. A kísérletben a σ_0 feszültségugrásra szintén ugrásszerű deformációugrással válaszol a vizsgált anyag, majd annak ellenére, hogy az ugrás után a feszültségterhelést állandó értéken tartjuk, tovább nő a nyúlás, a deformáció. Ezt nevezzük kúszásnak, és a vonatkozó nyúlás-idő görbeszakaszt kúszási, vagy folyási görbének nevezzük (Bodor és Vas 2000). A σ_0 terhelési szintű kúszásvizsgálatnál mért $\varepsilon(t)$ válaszból meghatározható az ún. kúszási engedékenység, vagy kúszási érzékenység:

$$D(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} \quad (2)$$

amely időfüggő anyagjellemző, aminek a reciproka a kúszási modulus.

3.3.1.2. Feszültségrelaxáció

Aszfaltanyagok feszültségrelaxáció vizsgálatánál ugrásszerű ε_0 nyúlásgerjesztést alkalmazunk. Válaszjellemzőként a próbatest két vége között mérhető $\sigma(t)$ feszültséget rögzítjük. A kezdeti σ_0 feszültség arányos a nyúlásgerjesztés ε_0 nagyságával. A feszültségrelaxáció azt jelenti, hogy az állandó értéken tartott deformáció mellett csökken, feloldódik az anyagban ébredő feszültség. Fontos megjegyezni, hogy a terhelés megszüntetése után a feszültség nullává válik, de a próbatest deformációja nem (Bodor és Vas 2000). Az időfüggő relaxációs modulust a relaxációs kísérlettel kapott $\sigma(t)$ válasz és az ε_0 terhelési szint hányadosaként értelmezzük:

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} \quad (3)$$

amely időfüggő anyagi jellemző, aminek a reciproka a relaxációs érzékenység.

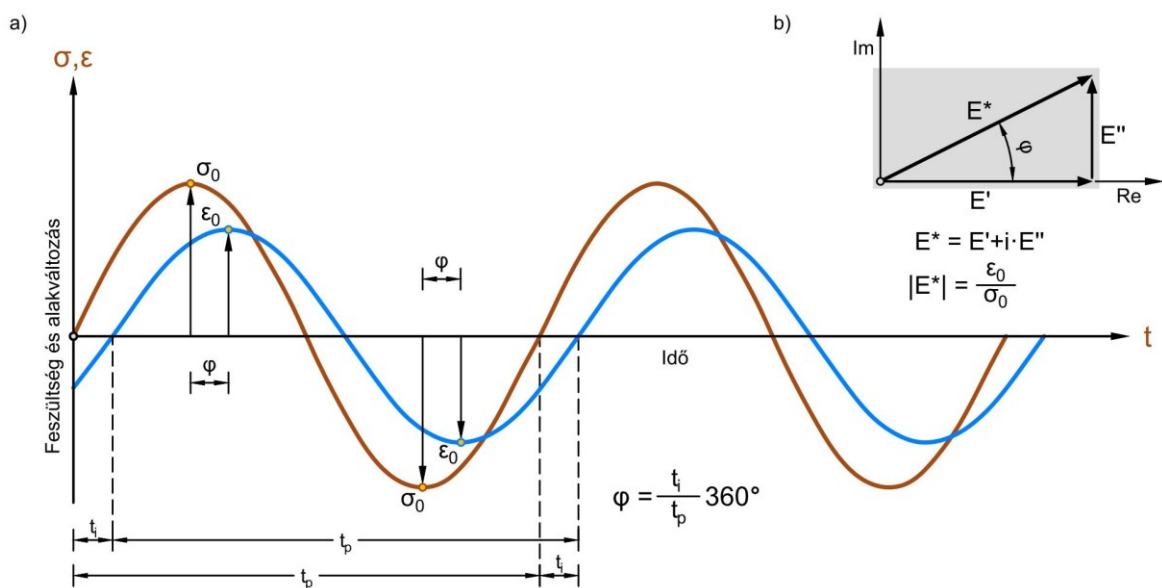
3.3.1.3. Anyagviselkedés ciklikus terhelésre

Laboratóriumban egy aszfalt-próbatesten $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t)$ alakú periodikus, tiszta szinuszos gerjesztést alkalmazunk, akkor az aszfaltkeverék viszkoelasztikus viselkedése miatt az alkalmazott szinuszosan változó elmozdulás és az ugyancsak szinuszosan változó feszültség között $\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t + \phi)$ fáziseltérés alakul ki az 17.a ábra szerint. Az $\omega = 2\pi f$ körsebességet az ismételt terhelésnél (fárasztásnál) alkalmazott f frekvencia határozza meg. Ha a vizsgált anyag tökéletesen rugalmas lenne, akkor a két szinusz-görbe periódusainak kezdő és végpontjai összeesnének. A dinamikus alakváltozási modulust, vagyis a komplex modulust most is a Hooke-féle anyagtörvény mintájára, de időfüggő módon értelmezzük:

$$E^*(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} \quad (4)$$

vagyis mindig a pillanatnyi t időpillanathoz tartozó σ és ε értékeket osztjuk egymással. A komplex modulus elnevezés onnan ered, hogy E^* értékét a komplex számsíkon előnyösebben lehet ábrázolni.

Számunkra most csak az a fontos, hogy a komplex modulus felbontható egy valós (reális), E' rugalmassági modulusra, valamint egy képzetes (imaginárius), E'' viszkózus részre. A komplex modulus valós értékét tárolási modulusnak nevezzük, mert a deformáció megszüntetéséhez szükséges feszültséget tárolja. A komplex modulus képzetes értéke az ún. veszteségi modulus, amely a feszültség azon részét képezi, amely az anyagban a deformáció közben rendszerint hő formájában elvész.



57. ábra. Az aszfaltanyag válasza zérus középvértékű, tiszta szinuszos lüktető gerjesztésre (a); a komplex rugalmassági modulus és összetevői a komplex síkon (b)

A komplex modulus abszolút értéke (a dinamikus modulus) az 17.b ábra alapján kiszámítható:

$$|E^*| = \sqrt{(E')^2 + (E'')^2} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (5)$$

A dinamikus modulusnál tehát σ_0 és ε_0 amplitúdókat osztjuk egymással, tekintet nélkül arra, hogy nem egy időpontban lépnek fel, hanem ϕ fáziskésésnek megfelelő időkülönbséggel következnek egymás után. Ennek a matematikai eredménynek a fizikai tartalmát az adja, hogy az E' rugalmassági modulusnak az értéke hűvösebb hőmérsékleten (20-25°C) elég közel esik az $|E^*|$ dinamikus modulushoz, ezért azt, mint rugalmassági modulus használhatjuk fel számításainkban. A dinamikus modulus és a fázisszög ismeretében a tárolási és a veszteségi modulusok szintén számolhatók:

$$E' = |E^*| \cos \phi \quad (6)$$

$$E'' = |E^*| \sin \phi \quad (7)$$

mivel

$$\tan \phi = \frac{E''}{E'} \quad (8)$$

Végül megjegyezzük, hogy a rugalmas anyagok ϕ fázisszöge 0° , míg a viszkózus anyagok fázisszöge 90° . A viszkoelasztikus anyagok fázisszöge 0° és 90° között változik. A témáról további részletek olvashatóak Ambrus és Bartha (1999) cikkében.

3.3.2. Idő-hőmérséklet egyenértékűség elv

Az idő-hőmérséklet ekvivalencia elv kimondja, hogy a thermoreológiai szempontból egyszerű anyagok relaxációs időállandói a hőmérsékletváltozás hatásra azonos mértékben változnak. Ebből következően a terhelési időtől függő mennyiségek, mint amilyen az aszfaltkeverékek E^* komplex modulusa, az időtengely mentén a hőmérséklettől függő mértékben eltolható, így a különböző hőmérsékleten mért anyagi jellemzők egyetlen diagramon ábrázolhatók, amit mestergörbének nevezünk.

Az idő-hőmérséklet ekvivalencia elve tehát lehetővé teszi, hogy a különböző hőmérsékleten és terhelési frekvencián begyűjtött adatokat egy ún. referencia hőmérséklethez vagy frekvenciához viszonyítva vízszintes irányban elmozdítsuk, és ezzel a különböző izotermákat összehangolva egyetlen mestergörbét alakítsunk ki.

A szuperpozíció matematikailag az ún. redukált frekvencia bevezetésével valósítható meg. Az α_T eltolási tényező meghatározza a vízszintes tengely mentén kívánt elmozdulást az adott hőmérsékleten. A tényleges f frekvenciát ezzel az eltolási tényezővel kell szorozni, hogy megkapjuk a mestergörbe redukált frekvencia értékét:

$$f_r = \alpha_T \cdot f \quad (9a)$$

$$\log(f_r) = \log(\alpha_T) + \log(f) \quad (9b)$$

A referencia hőmérsékleten az eltolási tényező természetesen $\alpha_T = 1$ értéket veszi fel. Adott referencia hőmérsékleten a mestergörbét úgy kell létrehozni, hogy más hőmérsékleteken felrajzolt izotermákat – szigorúan csak a terhelési időtartam vagy frekvencia tengelyével párhuzamosan – eltoljuk. A gyakorlatban sokszor az eltolási tényező értékének meghatározásához az ún. Arrhenius-féle egyenletet alkalmazzák (Md. Yusoff, Chailleux, és Airey 2011):

$$\log(\alpha_T) = \underbrace{\frac{0.4347 \cdot \Delta E_a}{R}}_{C_A} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) = C_A \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (10)$$

ahol

- α_T = eltolási tényező
- T = kísérleti hőmérséklet (K)
- T_0 = referencia hőmérséklet (K)
- ΔE_a = aktiválási energia (J mol⁻¹)
- R = egyetemes gázállandó (8.314 J mol⁻¹ K⁻¹)
- C_A = konstans (K)

Az Arrhenius-egyenletben csak a C_A konstans értékét kell meghatározni, hogy leírjuk az anyag viselkedését. A reológiában az Arrhenius-féle egyenlet mellett a másik, a közelmúltig leggyakrabban alkalmazott összefüggés az eltolási tényező meghatározására az Williams-Landel-Ferry (WLF) egyenlet volt (Painter és Coleman 1997). Mindkét klasszikus eltolási tényező használatos bitumenek és aszfaltkeverékek

vizsgálatára, de elsősorban polimerekre lettek kidolgozva, ezért alkalmazásuk napjainkban folyamatosan háttérbe szorult (Kim, Mohammad, és Elseifi 2015).

Nagyszámú rendelkezésre álló mérési adat esetén azonban lehetséges a klasszikus eltolási tényezők helyett az adatokra legjobban illeszkedő összefüggés paramétereinek valamilyen iterációs technika segítségével történő meghatározásakor az eltolási tényezőt is független változóként kezelni. Az optimalás elvégzésekor az eltolási tényezőt a nemzetközi szakirodalom jellemzően másodfokú függvénnyel javasolja megadni, például:

$$\log(\alpha_T) = a \cdot (T^2 - T_0^2) + b \cdot (T - T_0) \quad (11)$$

ahol

α_T = eltolási tényező
 T = kísérleti hőmérséklet
 T_0 = referencia hőmérséklet
 a, b = együtthatók

(Sakhaeifar 2011) szerint a fenti idő-hőmérséklet eltolódási tényező a és b együtthatói különféle aszfaltkeverékekre nem mutatnak jelentős változékonyságot, vagyis átlagos értékekkel jól lehet használni. A (11) négyzetes polinomiális egyenlet jól illeszkedik az eltolási tényezőkre a hőmérsékletek széles tartományában.

A log-lineáris modell az aszfaltkeverékek egyik legnépszerűbb hőmérséklet eltolási módszere. Az eltolási tényező kiszámítására szolgáló log-lineáris egyenlet a következő:

$$\log(\alpha_T) = C_1 \cdot (T - T_0) \quad (12)$$

ahol C_1 a $\log(\alpha_T)$ és a hőmérséklet közötti egyenes vonal meredeksége. Az eltolási tényezőkről további részletes ismertetőt ad Rowe és Sharrock (2011) kiváló munkája.

3.3.3. A dinamikus és relaxációs modulus mestergörbe

Az aszfaltkeverék dinamikus modulus mestergörbéje egy nemlineáris S-alakú ún. szigmoid-függvénnyel jól leírható. A szigmoid-függvény alkalmazhatósága a keverék viselkedésének fizikai megfigyelésével igazolható. Általános képlete az alábbi:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (13)$$

A mérési eredmények, a dinamikus modulusok birtokában megszerkeszthető a keverék mestergörbéje. Aszfaltkeverékek esetén a mestergörbét az alábbi képlettel adják meg a frekvencia függvényében (Pellinen, Witczak, és Bonaquist 2003):

$$\log|E^*| = d_1 + \frac{d_2}{1 + e^{d_3 + d_4 \cdot \log(f_r)}} \quad (14)$$

ahol

$|E^*|$ = az aszfaltkeverék dinamikus modulusa (MPa)

- f_r = a redukált frekvencia (Hz)
 d_1 = a dinamikus modulus minimuma (MPa)
 $d_1 + d_2$ = a dinamikus modulus maximuma (MPa)
 d_3, d_4 = a függvény alakját leíró paraméterek

A modell nagy hátránya, hogy a keverék E^* komplex modulusa helyett annak csupán abszolút értékét, a dinamikus modulust használja.

Az aszfaltkeverékek időfüggő relaxációs modulusát a dinamikus modulushoz hasonlóan ugyancsak szigmoid alakú függvényekkel tudjuk empirikusan közelíteni. Ebből adódóan a (14) modell megfelelő átalakítások után erre a célra is alkalmazható. A relaxációs függvény lényegében tehát ugyanolyan alakú, mint a (14) egyenlet, de új együtthatókkal (H. Lee 2022):

$$\log E(t_r) = c_1 + \frac{c_2}{1 + e^{c_3 + c_4 \cdot \log(t_r)}} \quad (15)$$

ahol $E(t_r)$ az időfüggő relaxációs modulus a t_r redukált időpontban, c_1 -től c_4 -ig pedig a modellálандók.

3.4. Útpályaszerkezet alakváltozások elemzése

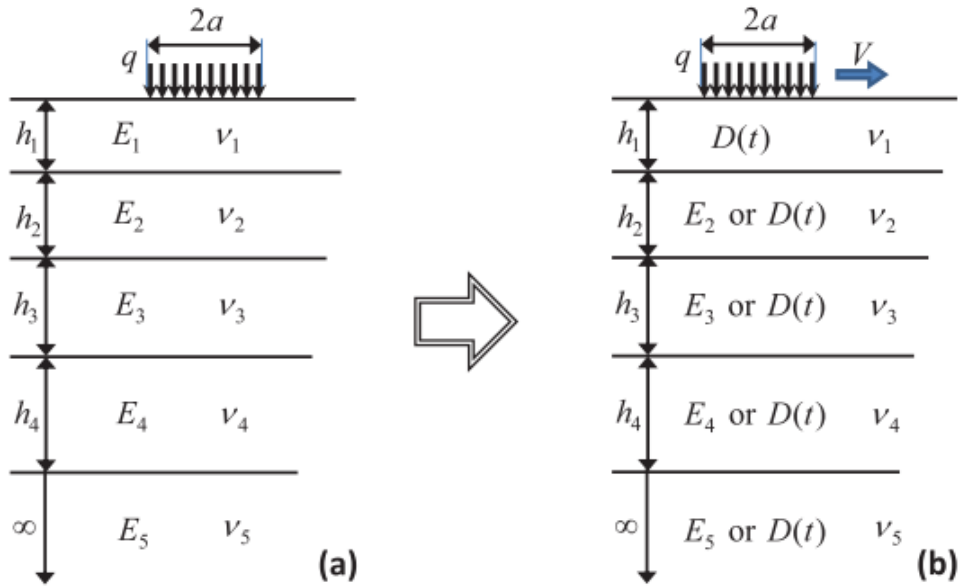
3.4.1. Kvázi statikus behajlásmérés mechanikai modellje

A kvázi statikus kerékterhelés mechanikai modelljének az elméleti hátterét Levenberg (2016) munkája alapján ismertetjük. Ennek elsődleges oka, hogy készült hozzá egy Excel tábla (ELLVA1), ami igen kényelmessé teszi a bonyolult és nehézkes számítások végrehajtását (Levenberg 2016b). Az érdeklődő Olvasó további részleteket talál a módszerről Levenberg (2013) munkájában.

Kiindulásként vegyünk egy lineárisan rugalmas rétegzett útpályaszerkezet rendszert (18. ábra), ami öt súlytalan egymáson fekvő réteg alkot. A rétegek sorszámozása most is felülről lefelé növekszik, az 5. legalsó réteg a végtelen homogén féltér. A kerékterhelést egy a sugarú körfelületen egyenletesen megoszló q intenzitású erőrendszerrel modellezzük. A statikus álló kerékterhelés hatására a lineárisan rugalmas útpályaszerkezet rendszerben ébredő bármely reakció, azaz elmozdulás, feszültség vagy alakváltozás a következőképpen írható fel:

$$R(t) = R_H^e(E_1, \dots, E_5; \mu_1, \dots, \mu_5; h_1, \dots, h_4; q, a) \cdot H(t) \quad (16)$$

ahol $R(t)$ a szerkezet t időpontban adott válaszát, $R_H^e(\cdot)$ pedig a kernelfüggvényt jelöli, amely megtestesíti az összes mögöttes rugalmassági számítást. A kernelfüggvény nem csak a rétegjellemzőktől (vastagság, rugalmassági modulus, Poisson-féle tényező), hanem a szerkezeten belül vizsgált pont koordinátáitól is függ. A hirtelen fellépő kerékterhelést matematikailag a $H(t)$ Heaviside (egységugrás) függvénnyel történő szorzás fejezi ki.



18. ábra. Pályaszerkezet modell: a) lineárisan rugalmas és b) viszkoelasztikus rendszer

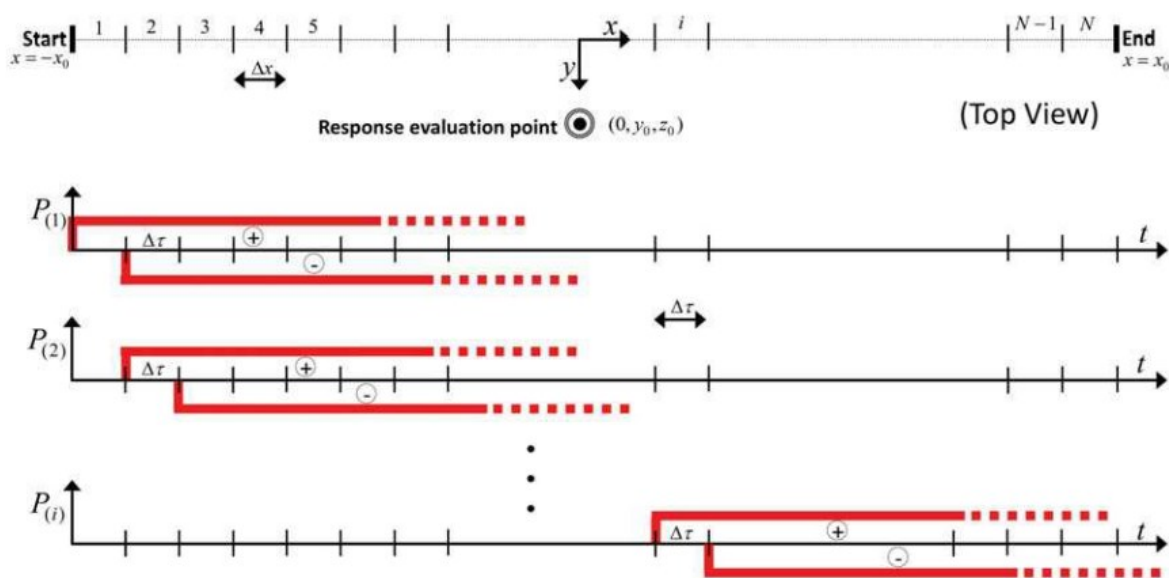
A lineárisan rugalmas rendszerből a viszkoelasztikus (VE) modellt úgy származtatjuk, hogy egy vagy több rugalmas réteget VE-réteggel helyettesítünk. Az alábbi levezetés azon a feltételezésen alapul, hogy a legfelső aszfaltréteg mindig VE-réteg, amit a $D(t)$ kúszási engedékenység és az állandó értékű μ_1 Poisson-szám egyértelműen jellemez (Levenberg és Uzan 2007), míg a többi réteg rugalmas anyagtulajdonságú marad. Ugyanakkor nincs annak sem elvi akadálya (ha a számítógépes program támogatja), hogy bármennyi réteget VE-réteggel helyettesítsünk a modellben. Ezt követően a VE-rendszerre hirtelen ható, mozdulatlan (statikus) F kerékterhelés esetében a kapott időfüggő reakció a következő lesz:

$$R_H^{ve}(t) \approx R_H^e(D^{-1}(t), E_2, \dots, E_5; \mu_1, \dots, \mu_5; h_1, \dots, h_4; q, a) \quad (17)$$

ahol $R_H^{ve}(t)$ a szerkezet t időpontban adott viszkoelasztikus válasza. A (17) képletből jól látható, hogy a szerkezet viszkoelasztikus válasza visszavezethető a lineárisan rugalmas útpályaszerkezet modell $R_H^e(\cdot)$ kernelfüggvényére, ahol E_1 helyébe $D(t)^{-1}$ kerül. A felírt összefüggés az inverz Laplace-transzformáció ún. kvázi-elasztikus közelítésén alapul (Schapery 1962).

Annak ellenére, hogy a (17) egyenlet elsősorban statikus terhelésre vonatkozik, azzal mégis jól szimulálható egy tetszőleges vonal mentén mozgó kerékterhelés is. Ahhoz, hogy a kerék csak egy pillanatra tudja kifejteni hatását a szerkezetre, az F kerékterhelést először az értékelési ponthoz képest távoli helyen működtetjük, hogy a generált szerkezeti válaszok elhanyagolhatóan kicsik legyenek. Egy rövid $\Delta\tau$ időtartam után a F kerékterhelést megszüntetjük, hogy ugyanazon a helyen csak ellenkező előjellel újra ráhelyezzük a rendszerre. A keréktávoltítás pillanatában az F terhelést a haladási irány mentén egy olyan szomszédos helyen alkalmazzuk, amely az értékelési ponthoz közelebb van mint Δx . A folyamat megismétlése lényegében egy mozgó terhet

szimulál, amely $V = \Delta x / \Delta t$ sebességgel közelít az értékelési ponthoz, annak közelében elhalad, és folytatja útját, amíg a másik irányba el nem tűnik. A szimuláció akkor fejeződik be, amikor a kiértékelési pontban a reakció ismét elhanyagolhatóan kicsi. A fent leírt eljárást grafikusán a 19. ábra mutatja be. Az ábra felső részén a féltér felülnézetét látjuk. Egy derékszögű koordinátarendszer látható, amelynek origója a burkolat felszínén van, az x -tengely egybeesik a haladási iránnyal, az y -tengely keresztirányban mutat, a z -tengely (ami nem látható) pedig a szerkezet belsejébe mutat. A kerékterhelés egyenes vonalban mozog $x = -x_0$ kezdő- és $x = +x_0$ végpontok között. Az útvonal N intervallumra ($i = 1, \dots, N$) van felbontva, amelyek mindegyike $\Delta x = 2x_0/N$ hosszú. Az ábrán a reakciók értékelési pontja is fel van tüntetve; ez a pont a haladási útvonal közepén található (azaz x -koordinátája nulla), y -koordinátája y_0 , és z_0 a felszín alatti mélységet jelöli.



19. ábra. A terhelés és tehermentesítés sémája a mozgó kerék szimulálásakor

A 19. ábra alsó része a mozgó kerék $P_1(t), P_2(t), \dots, P_i(t)$ terhelés és tehermentesítés állapotainak előzményeit szemlélteti. A $P_i(t)$ kerékterhelést a Δx szélességű intervallum bal oldalán működtetjük úgy, hogy minden egyes terhelés és tehermentesítés állapot között $\Delta \tau = \Delta x / V$ időkülönbség legyen. Ezért ezek a $P_i(t)$ terhelési előzmények az intenzitásuk és időtartamuk tekintetében azonosak, de eltérőek egymástól az alkalmazás helyét tekintve, mivel a terhelés folyamatosan a kezdőponttól a végpont felé tart.

Mivel az útpályaszerkezet modell lineáris egyenletekkel leírható fizikai rendszer, a szuperpozíció elve alkalmazható. Így a keresett szerkezeti válasz kiszámítható az összes terhelés és tehermentesítés sorozat időbeli hatásának összegzésével. Matematikailag a szuperpozíció az egymást követő független hatások összegzését jelent a $t = 0, \Delta \tau, 2\Delta \tau$ és $3\Delta \tau$ időpontokra (18. egyenlet):

$$\begin{aligned}
R^{ve}(0) &= R_H^{ve}(D(0)^{-1}, x(0)) \\
R^{ve}(\Delta\tau) &= R_H^{ve}(D(\Delta\tau)^{-1}, x(0)) - R_H^{ve}(D(0)^{-1}, x(0)) + R_H^{ve}(D(0)^{-1}, x(\Delta\tau)) \\
R^{ve}(2\Delta\tau) &= R_H^{ve}(D(2\Delta\tau)^{-1}, x(0)) - R_H^{ve}(D(\Delta\tau)^{-1}, x(0)) + R_H^{ve}(D(\Delta\tau)^{-1}, x(\Delta\tau)) \\
&\quad - R_H^{ve}(D(0)^{-1}, x(\Delta\tau)) + R_H^{ve}(D(0)^{-1}, x(2\Delta\tau)) \\
R^{ve}(3\Delta\tau) &= R_H^{ve}(D(3\Delta\tau)^{-1}, x(0)) - R_H^{ve}(D(2\Delta\tau)^{-1}, x(0)) + R_H^{ve}(D(2\Delta\tau)^{-1}, x(\Delta\tau)) \\
&\quad - R_H^{ve}(D(\Delta\tau)^{-1}, x(\Delta\tau)) + R_H^{ve}(D(\Delta\tau)^{-1}, x(2\Delta\tau)) - R_H^{ve}(D(0)^{-1}, x(2\Delta\tau)) \\
&\quad + R_H^{ve}(D(0)^{-1}, x(3\Delta\tau))
\end{aligned}$$

ahol $R^{ve}(t)$ a szerkezet t időpontban a kiválasztott vizsgálati pontra adott viszkoelasztikus válaszát jelöli. Az $R_H^{ve}(D(t)^{-1}, x(t))$ függvény a (17) egyenletben van részletesen kifejtve, most csak azt a két paramétert jelöljük, ami az idő előrehaladtával módosul. Az egyik az aszfaltanyag viselkedését leíró $D(t)$ kúszási engedékenysége, a másik pedig a mozgó terhelés x -tengely mentén elfoglalt $x(t) = Vt - x_0$ helyzete. Az összes többi időfüggetlen paramétert, amely a $R_H^{ve}(\cdot)$ értéket szabályozza, az áttekinthetőség kedvéért elhagytuk. Ezek közé tartoznak a rétegvastagságok és anyagparaméterek, az y_0 és z_0 értékelési pont koordinátái, valamint a q és a terhelési jellemzők. Végül a (18) egyenlet által mutatott összegzési mintát egészen addig kell végrehajtani, míg $t = (N + 1)\Delta\tau$.

3.4.1.1. Az ELLVA1 Excel munkafüzet

Az előbbiekben bemutatott számítási eljárás az ELLVA1 elnevezésű Excel munkafüzet betöltésével bárki számára ingyenesen kipróbálható. Az ELLVA1 egyetlen Main elnevezésű munkalapot (Főképernyő) tartalmaz, ahol megtaláljuk az összes bemeneti paramétert, valamint táblázatos formában a számítások eredményét is. A sárga színnel jelölt cellák nyitottak, tehát a felhasználó által szabadon módosíthatóak. A munkalapon nincs Run (Futtatás) gomb, minden inputváltoztatás esetén a számítások automatikusan újra lefutnak. A Főképernyő bal oldalán három beviteli kategória található, amelyek a következők:

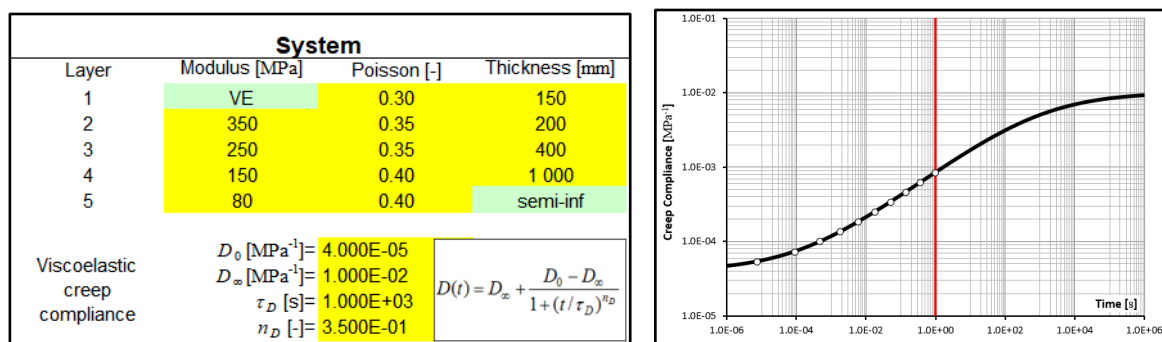
- 3.) System (Rendszer)
- 4.) Loading (Terhelés)
- 5.) Response (Válasz)

A Főképernyő középső részét a programmal kapcsolatos általános jellegű információk és a mozgó kerékterhelés felülnézeti vázrajza tölti ki. A geotechnikában szokásos módon a normál feszültségek vagy nyúlások negatív előjele a húzást jelöli. A főképernyő jobb oldala a számítási eredmények táblázatos formában történő megjelenítésére szolgál.

A 20. ábra az útpályaszerkezet modell input felületét mutatja be, ahol a felhasználó meghatározza a rétegek tulajdonságait és vastagságát. A legfelső réteg (1. réteg) mindig VE (azaz viszkoelasztikus), amelyhez a következő kúszási engedékenységi képlet társul (Smith 1971):

$$D(t) = D_{\infty} + \frac{D_0 - D_{\infty}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_D}\right)^{n_D}} \quad (19)$$

ahol D_0 és D_{∞} meghatározza a görbe felső és alsó aszimptotáját, míg τ_D és n_D a D_0 és D_{∞} közötti átmenetet meghatározó alakváltozási paraméterek. Ha feltételezzük, hogy az aszfaltkeveréket termoreológiai szempontból egyszerű anyag, akkor csak τ_D függ a hőmérséklettől.



20. ábra. A pályaszerkezet modell input felülete (bal) és az aszfaltréteg $D(t)$ görbéje (jobb)

Az ELLVA1 tartalmaz egy $D(t)$ Chart nevű lapot (20. ábra, jobb), ahol a $D(t)$ kúszási engedékenység a $t = 10^{-6}$ és $t = 10^6$ másodpercek közötti tartományban grafikusán ábrázolva van. A D_{∞} az aszfaltok esetében jellemzően két-három nagyságrenddel nagyobb, mint a D_0 . Ha a D_{∞} -et szándékosan jóval nagyobbak választjuk D_0 -nél, akkor a felső 1. réteg viselkedése időfüggetlenné válik és az $1/D_0$ érték megfelel a Young-féle rugalmassági modulusnak.

A felső rétegen kívüli további rétegek is VE-ként kezelhetők, ha szükséges; mindez úgy érhető el, hogy a modulusértéket VE betűkkel helyettesítjük. Ezáltal a program arra utasítható, hogy a kiválasztott réteg(ek)hez társítsa a kúszási engedékenység függvényt (19. egyenlet). Amikor minden réteget VE-ként jelölünk, és a Poisson-számok is azonosak, akkor tulajdonképpen megkapjuk a viszkoelasztikus féltér problémáját.

A 21. ábra a kerékterhelés input felületét szemlélteti. Itt tudjuk a q terhelésintenzitást, a terhelő kerék érintkezési sugarát, a V mozgási sebességet, valamint a szimuláció kezdőkoordinátáját ($-x_0$) megadni. Ez utóbbi paraméter lényegében meghatározza a Δx méretét, mivel az ELLVA1 egy előre beállított $N = 200$ értékkel számol. Az ábrán látható példa esetében $\Delta x = 2x_0/N = 100$ mm. Mivel csak egyetlen terhelésáthaladást szimulál a program, a teljes szimulációs időtartam $t_{max} = 2x_0/V$, ami egy függőleges vörös vonalként jelenik meg a $D(t)$ Chart grafikonon (20. ábra, jobb). Ez jelzi, hogy a $D(t)$ görbe mely része képezi a számolást, $t = 0$ -tól kezdődően.

Loading			
Load	Stress [MPa]	Radius [mm]	Speed V [mm/s]
L_1	1.10	150.00	20000.0
Start coordinate $-x_0$ [mm]= -10000			

21. ábra. A kerékterhelés jellemzői

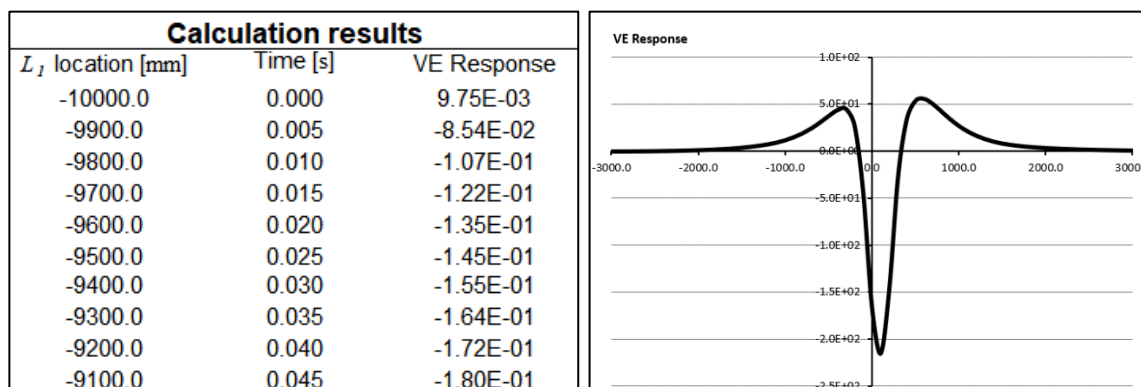
A számítási munka gyorsítása érdekében a költséges kernelfüggvény kiértékeléseket a következő 16 különböző, 0 és x_0 közötti elmozdulási értékre szűkítettük: 0, Δx , $2\Delta x$, $3\Delta x$, $4\Delta x$, $5\Delta x$, $6\Delta x$, $8\Delta x$, $10\Delta x$, $15\Delta x$, $20\Delta x$, $30\Delta x$, $40\Delta x$, $60\Delta x$, $80\Delta x$ és $100\Delta x$. Ugyancsak a számítások gyorsítása miatt a kernelfüggvény kiértékelését 11 csúszási engedékenységi értékre szűkíti az Excel 0 és t_{max} között. Ezen értékek a D_0 és a $D(t_{max})$ közötti logaritmikus skálán egyenletesen oszlanak el. Az így kapott értékeket a $D(t)$ Chart ábrán kör szimbólumok jelölik.

A program minden egyes újra futtatásakor összesen 176 (11×16) számítást végez el. Ezek az eredmények alkotják a megoldás alapláncját, amit tovább bővítünk, kihasználva először a rugalmas válaszok y -tengely körüli szimmetriáját (vagy antiszimmetriáját), hogy a nulla és $-x_0$ közötti negatív eltolódásokat is megkapjunk. A köztes megoldásokat köbös spline interpolációval számítja a program, így egy sokkal sűrűbb, körülbelül 20 000 rugalmas megoldásból álló mátrix jön létre. Erre a célra egy makró lett kifejlesztve, amely a spline interpolációs lehetőséggel bővíti a munkalap képességeit. Megjegyzendő, hogy a spline-interpoláció alkalmazása csak akkor érvényes, ha a válaszerőértékek az $x(t)$ és $D(t)$ sima függvényei.

Response			
	y_0 [mm]	z_0 [mm]	Layer #
Evaluation point	0.00	150.00	1
Response ID	7	Strain in X [microstrains]	
Response ID	Response type	Direction	
1	Stress	X	
2		Y	
3		Z	
4		YZ	
5		XZ	
6		XY	
7	Strain $\times 10^6$	X	
8		Y	
9		Z	
10		YZ	
11		XZ	
12		XY	
13	Displacement	X	
14		Y	
15		Z	

22. ábra. A vizsgálati pont koordinátája és a szerkezeti válasz megadása

A 22. ábra a szerkezeti válaszok (Response) beviteli felületét mutatja, ahol a felhasználó megadja a programnak, hogy milyen számítást végezzen. Ez magában foglalja az y_0 és z_0 kiértékelési pont koordinátáit, valamint egy azonosítót. Konkrétan 1 és 15 közötti azonosító számot (Response ID), amelyhez egy választási lehetőségeket tartalmazó táblázat tartozik. A bemutatott példában, a kiválasztott válasz-azonosító a 7, amely az x -tengely irányú alakváltozást jelzi.



23. ábra. Szerkezeti válasz táblázat (bal) és grafikon (jobb)

A végleges számítási eredményeket táblázatos formában közli a program, ami egy 201×3 -as adattömb. Ennek a kimenetnek a formátuma a 23. ábra első 10 sorára (a 201-ból) vonatkozóan kerül bemutatásra. A baloldali oszlop a terhelés helyét, azaz a mozgó kerék $x(t)$ középpontjának x -koordinátáját mutatja. A második oszlop a megfelelő szimulációs időt mutatja a következő kifejezés szerint: $t = (x(t) + x_0)/V$. A jobb szélső oszlop a VE-választ sorolja fel a kiválasztott válasz-azonosítóhoz az adott kiértékelési ponton. A szerkezeti válasz grafikus ábrázolása a VE Response Chart (VE-válaszdiagram) nevű lapon található.

3.4.1.2. Mintaszámítás

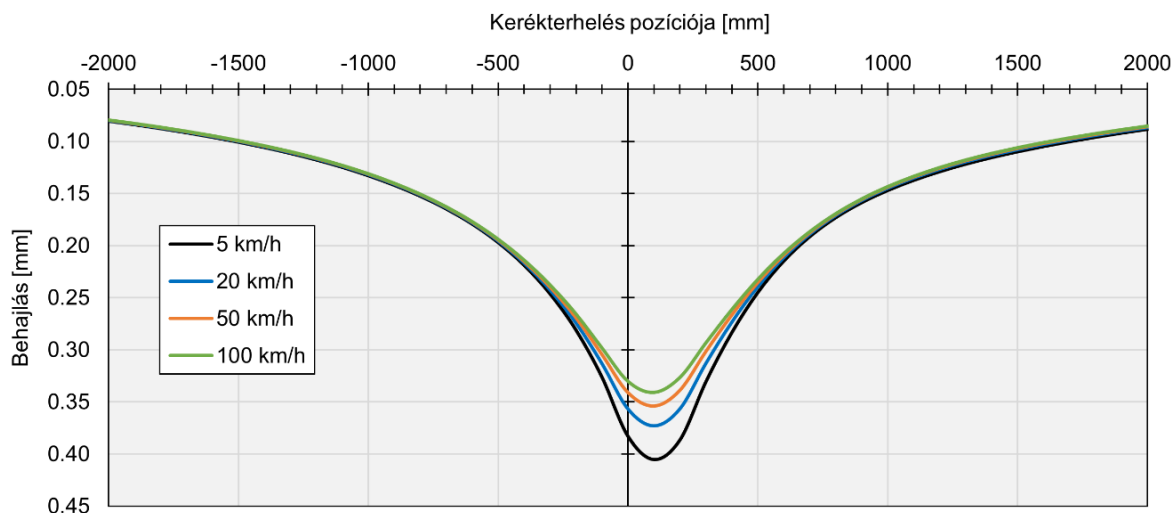
A következő mintaszámításban egy hajlékony útpályaszerkezet behajlási vonalát fogjuk kiszámítani eltérő sebességgel mozgó kerékterhelés hatására. A számítás első felében a direkt modellt alkalmazzuk, megnézve a terhelési idő és a hőmérséklet hatását a maximális behajlásokra, a második felében pedig bemutatjuk, hogy a behajlásokból visszaszámítható $D(t)$ kúszási engedékenységből, hogyan lehet az aszfaltréteg dinamikus modulusát kiszámítani egy adott referencia hőmérsékletre.

A felső aszfaltréteg anyagi tulajdonságát most is a (19) kúszási engedékenység mestergörbével vesszük figyelembe. A szerkezet felépítését, a rétegek anyagjellemzőit, a kerékterhelés jellemzőit és a vizsgálati pont koordinátait a 24. ábra tartalmazza.

A mozgó kerékterhelés V sebességét km/ó mértékegységben a D17 cella képletének első számértékének átírásával tudjuk beállítani.

System			
Layer	Modulus [MPa]	Poisson [-]	Thickness [mm]
1	VE	0.30	150
2	350	0.35	200
3	250	0.35	400
4	150	0.40	1 000
5	80	0.40	semi-inf
Viscoelastic creep compliance	D_0 [MPa ⁻¹]=	3.913E-05	$D(t) = D_\infty + \frac{D_0 - D_\infty}{1 + (t/\tau_D)^{n_D}}$
	D_∞ [MPa ⁻¹]=	1.093E-01	
	τ_D [s]=	2.204E+07	
	n_D [-]=	3.025E-01	
Loading			
Load	Stress [MPa]	Radius [mm]	Speed V [mm/s]
L_1	0.70	150.00	5555.6
Start coordinate $-x_0$ [mm]=		-10000	
Response			
	y_0 [mm]	z_0 [mm]	Layer #
Evaluation point	0.00	0.00	1
Response ID	15	Displacement in Z [mm]	

24. ábra. A kvázi statikus pályaszerkezet modell bemenő paraméterei



25. ábra. Eltérő kerék sebesség hatására ébredő behajlások a szerkezet felszínén

Vizsgálatunkban 5, 20, 50 és 100 km/ó sebességekre kiszámítjuk a szerkezet alakváltozását, majd összevetjük a maximális behajlások nagyságát. Fontos, hogy helyesen adjuk meg a vizsgálati pont koordinátáit, ehhez az $x_0 = 0$ és $z_0 = 0$ értékeket a B23 és C23 cellákban, valamint a ResponseID=15 értéket kell beállítani. A számítás eredményét a 25. ábra foglalja össze. Látható, hogy a kerékterhelés sebességétől függ a maximális alakváltozás nagysága:

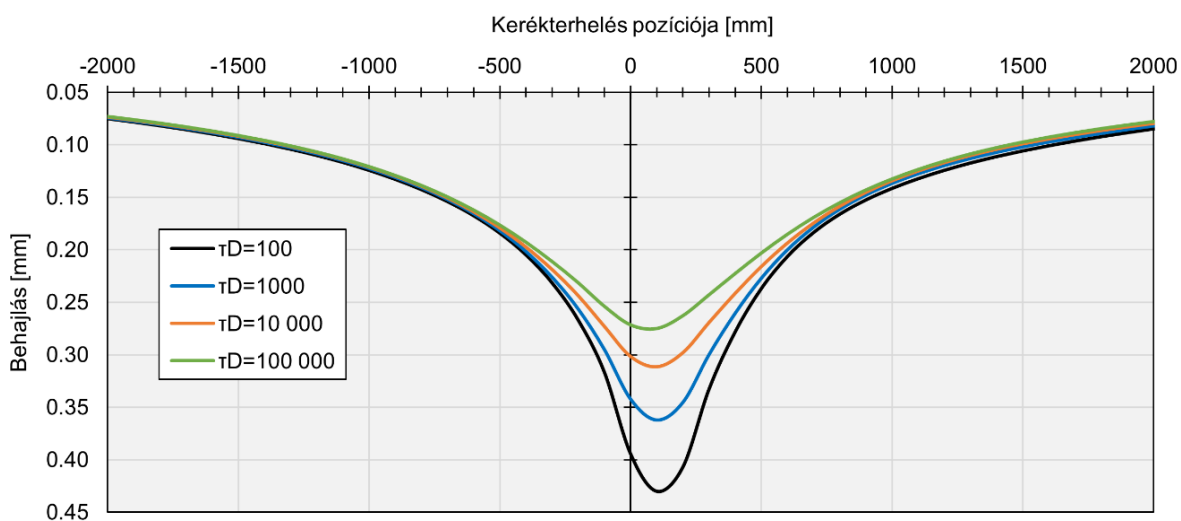
V	5 km/ó	20 km/ó	50 km/ó	100 km/ó
D_{max}	0,40 mm	0,37 mm	0,35 mm	0,34 mm

Ez a modellszámítás jól demonstrálja azt, hogy a mért alakváltozások nem értelmezhetőek helyesen anélkül, hogy ne ismernénk pontosan a terhelési időt. A maximális behajlások alacsonyabb sebességeknél magasabbak, mint nagyobb sebességeknél.

A hőmérséklet hatását is megvizsgálhatjuk a modell segítségével, hiszen a (19) egyenletben egyedül τ_D függ a hőmérséklettől. Ezért állandó, pl. 20 km/ó sebességgel haladó kerékterhelés feltételezése mellett, ha τ_D értékét 100, 1000, 10 000 és 100 000 értékekere állítjuk, akkor a magasabb hőmérsékletektől az alacsonyabbak felé haladva megkapjuk az aszfalkeverék hőmérsékletfüggő viselkedését. A modellszámítás eredményét grafikusán a 26. ábra foglalja össze. A maximális behajlások, pedig az alábbiak szerint módosulnak:

τ_D	100	1000	10 000	100 000
D_{max}	0,43 mm	0,36 mm	0,31 mm	0,27 mm

A hőmérséklet hatása jelentős a maximális alakváltozásokra. Ezért behajlásméréskor az aszfaltréteg hőmérsékletét mindig meg kell mérni, hogy később a szükséges korrekciók elvégezhetőek legyenek. Viszont érdemes felhívni arra most a figyelmet, hogy a (19) kúszási engedékenységi függvény egy adott referencia hőmérsékletre vonatkozik.



26. ábra. *Eltérő aszfalthőmérséklet hatására ébredő behajlások a szerkezet felszínén*

Abban az esetben, ha az ELLVA1 munkafüzetrel nem előrefele számítjuk a behajlásokat, hanem azokból visszszámítjuk az aszfaltréteg $D(t)$ mestergörbéjének paramétereit a következőre kell figyelniük. Minden egyes mérési helyen a mért behajlásokhoz tartozni fog egy $D(t)$ mestergörbe és ahhoz egy aszfalt hőmérséklet, amire az vonatkozik. Ahhoz, hogy referencia hőmérsékletre tartozó dinamikus moduluszt kapjunk, először is időtartományból át kell térni frekvenciatartományba, majd a dinamikus modulus mestergörbét el kell tolni a megválasztott pl. 20°C értékű

referencia hőmérsékletre. Mivel a viszkoelasztikus anyagtulajdonságok egymásba átszámíthatóak, a $D(t)$ kúszási érzékenységből kiszámítható időtartományban az $E(t)$ relaxációs modulus és frekvencia tartományban az $|E^*|$ dinamikus modulus. Természetesen ez az átalakítás visszafelé is működik. A viszkoelasztikus összehasonlító számításokhoz felhasználhatjuk az ELiCon v0.1 Microsoft Excel munkalapot (Levenberg 2018), amivel valós időben tudunk egzakt átszámítást végezni az idő- és a frekvenciatartomány között. Az ELiCon v0.1 bemenete az időtartományban az a négyparaméteres analitikus függvény, amit az ELLVA1 is használ a kúszási engedékenységre. Az ELiCon v0.1 munkalap a fenti egyenlettel kiszámítja adott időpontokra az egytengelyű kúszási engedékenységet, valamint a relaxációs modulus értékét is megadja ugyanezen időpontokra. Frekvenciatartományban a munkalap kimenete bizonyos frekvenciákra a komplex modulus abszolút értéke (a dinamikus modulus) és a fázisszög. Az átszámítás az általánosított Maxwell-modell Prony-során alapul. Az ELiCon v0.1 munkalap letölthető az alábbi oldalról:

<https://www.academia.edu/35945069/ELiCon>

Az ELiCon v0.1 munkalap megnyitása után az Input csoportban megadhatjuk az (XY) mestergörbe paramétereit, és automatikusan megkapjuk adott frekvenciákra (I oszlop) a dinamikus modulus értékeket a J oszlopban.

The worksheet ELiCon (version 0.1) performs real-time viscoelastic interconversion in the time and frequency domains. ELiCon accepts as input a four-parameter analytical expression for the uniaxial creep compliance. The time-domain output consists of a list of creep compliance values for certain times, and a corresponding list of relaxation modulus values. The frequency-domain output consists of, for certain frequencies, the norm of the complex modulus and the phase angle. Developed by Eyal Levenberg, Technical University of Denmark, February 2018. For questions, requests, and comments, contact: eyal.levenberg@yahoo.com									
Input		Time-domain output				Frequency-domain output			
Creep compliance properties:		Time [s]	Creep compliance [1./MPa]	Relaxation modulus [MPa]		Frequency [Hz]	Complex modulus norm [MPa]	Phase angle [Degrees]	
D_0	3.913E-05 [1./MPa]	1.00E-15	3.915E-05	2.555E+04		1.00E-15	9	0.1	
D_∞	1.093E-01 [1./MPa]	5.62E-15	3.916E-05	2.554E+04		1.00E-14	9	0.6	
τ_D	2.204E+07 [s]	3.16E-14	3.918E-05	2.552E+04		1.00E-13	9	1.2	
n_D	3.025E-01 [-]	1.78E-13	3.922E-05	2.550E+04		1.00E-12	10	1.9	
$D(t) = D_\infty + \frac{D_0 - D_\infty}{1 + (t / \tau_D)^{n_D}}$		1.00E-12	3.928E-05	2.546E+04		1.00E-11	11	3.8	
		5.62E-12	3.939E-05	2.539E+04		1.00E-10	12	6.7	
		3.16E-11	3.956E-05	2.528E+04		1.00E-09	15	10.3	
		1.78E-10	3.986E-05	2.508E+04		1.00E-08	20	14.7	
		1.00E-09	4.037E-05	2.477E+04		1.00E-07	32	19.3	
		5.62E-09	4.122E-05	2.425E+04		1.00E-06	55	22.5	
		3.16E-08	4.266E-05	2.343E+04		1.00E-05	100	24.2	
		1.78E-07	4.508E-05	2.214E+04		1.00E-04	190	25.9	
		1.00E-06	4.916E-05	2.025E+04		1.00E-03	372	26.2	
		5.62E-06	5.605E-05	1.766E+04		1.00E-02	724	25.8	
		3.16E-05	6.765E-05	1.447E+04		1.00E-01	1405	25.8	
		1.78E-04	8.722E-05	1.103E+04		5.00E-01	2210	24.9	
		1.00E-03	1.202E-04	7.825E+03		1.00E+00	2701	24.5	
		5.62E-03	1.757E-04	5.225E+03		5.00E+00	4135	23.2	
		3.16E-02	2.693E-04	3.339E+03		1.00E+01	4908	21.9	
		1.78E-01	4.267E-04	2.075E+03		2.50E+01	6133	21.2	
		1.00E+00	6.910E-04	1.267E+03		1.00E+02	8301	18.7	
		5.62E+00	1.134E-03	7.676E+02		1.00E+03	12746	14.2	
		3.16E+01	1.872E-03	4.636E+02		1.00E+04	17142	9.3	
		1.78E+02	3.095E-03	2.805E+02		1.00E+05	20557	5.6	
		1.00E+03	5.095E-03	1.710E+02		1.00E+06	22838	3.1	
		5.62E+03	8.301E-03	1.057E+02		1.00E+07	24142	1.6	
		3.16E+04	1.328E-02	6.680E+01		1.00E+08	24827	0.8	
		1.78E+05	2.066E-02	4.366E+01		1.00E+09	25191	0.4	
		1.00E+06	3.082E-02	2.988E+01		1.00E+10	25374	0.2	
		5.62E+06	4.353E-02	2.164E+01		1.00E+11	25465	0.1	
		3.16E+07	5.763E-02	1.669E+01		1.00E+12	25512	0.1	
		1.78E+08	7.135E-02	1.371E+01		1.00E+13	25535	0.0	
		1.00E+09	8.308E-02	1.190E+01		1.00E+14	25547	0.0	
		5.62E+09	9.206E-02	1.081E+01		1.00E+15	25554	0.0	
		3.16E+10	9.836E-02	1.014E+01					
		1.78E+11	1.025E-01	9.745E+00					

27. ábra. Az idő-frekvencia átváltást segítő ELiCon munkafüzet

A dinamikus modulus (14) mestergörbe modell paramétereit megkapjuk, ha az I-J oszlop adataira azt a legkisebb négyzetek módszerével illesztjük. A számítás eredménye grafikusan is megjeleníthető, a dinamikus modulus mestergörbe együtthatói a példánkban az alábbiak:

$$d_1 = 0,89 \quad d_2 = 3,55 \quad d_3 = -0,96 \quad d_4 = -0,37$$

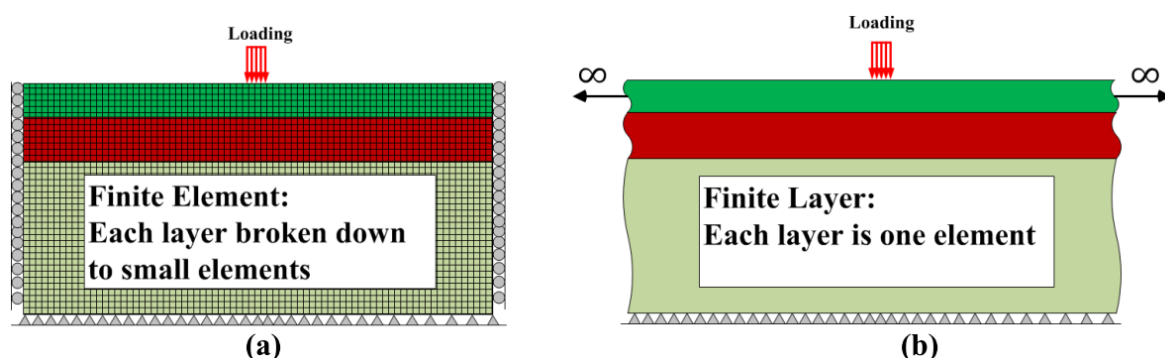
A mestergörbe fenti paramétereit egy adott $T = 30^\circ\text{C}$ hőmérsékletre tartozik, ezért azt el kell tolni a $T_0 = 20^\circ\text{C}$ referencia hőmérsékletre. A dinamikus modulus mestergörbe modell referencia hőmérsékletre eltoló d_{3T_0} paramétere a következő képlettel kiszámítható az eltolási függvény felhasználásával:

$$d_{3T_0} = d_3 + d_4(-a(T^2 - T_0^2) - b(T - T_0)) \quad (20)$$

A dinamikus modulus eltolása tulajdonképpen maga a hőmérséklet korrekció. A terhelési idő figyelembevétele pedig a terhelési frekvencia megválasztásával történik. A példánkban maradván $T = 30^\circ\text{C}$ kísérleti hőmérsékleten az aszfaltréteg dinamikus modulusa 4830 MPa, míg $T_0 = 20^\circ\text{C}$ referencia hőmérsékleten 9630 MPa, ha a terhelési frekvenciát 10 Hz-nek választjuk.

3.4.2. Impulzusalapú behajlásmérés mechanikai modellje

A dinamikus (impulzusszerű) terhelés hatására ébredő szerkezeti válaszok (pl. behajlás) modellezése alapvetően a mechanikai hullámok terjedésének elméletén alapul. A dinamikus visszaszámítás terén a közelmúltban végzett legtöbb fejlesztés a véges réteg módszer (Finite Layer Method, FLM) néven ismert mechanisztikus modellekkel történt. Amint azt a 28. ábra vázlatosan mutatja, az FLM abban az értelemben hasonlít a véges elem-módszerhez (Finite Element Method, FEM), hogy az elemzéshez a teljes szerkezetet (azaz a rugalmas útpályaszerkezetet) geometriai értelemben elemi darabokra bontja. A különbség a vizsgált elemek matematikai megfogalmazásában, és abban van, ahogy az elemek felépítik a pályaszerkezet modellt.



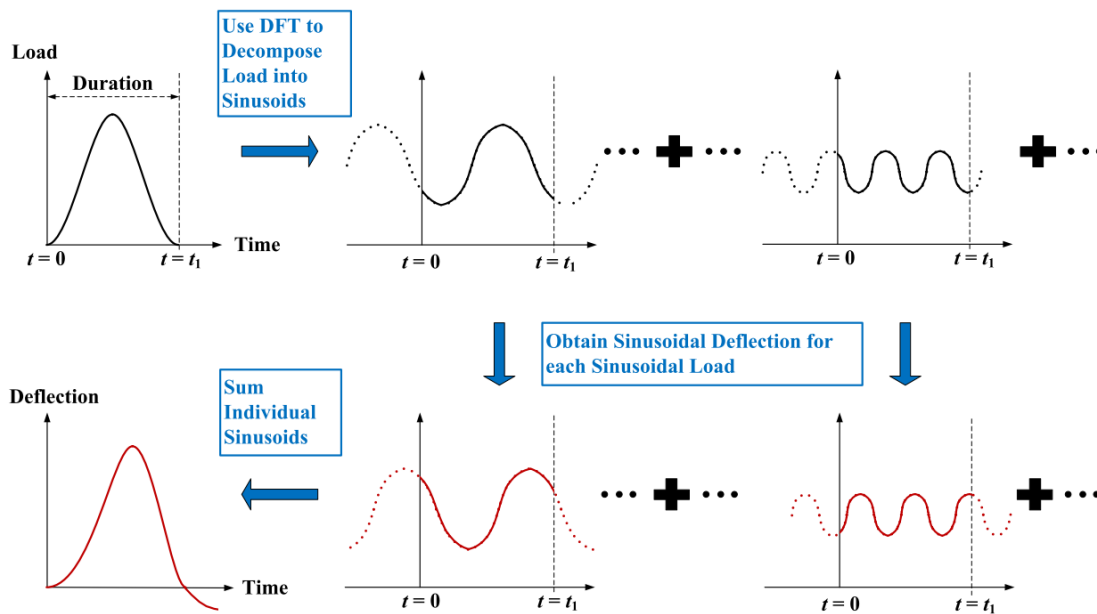
28. ábra. Modell koncepciók: a) véges elem módszer és b) véges réteg módszer (H. Lee 2022)

Pontos és megbízható eredményeket csak akkor kapunk a véges elem módszertől, ha az útpályaszerkezet modell minden egyes rétegét nagyszámú kisebb elemre bontjuk. A

nagy elemszám miatt a FEM hosszú számítási idővel jár, ami általában alkalmatlanná teszi a gyakorlat szempontjából a visszaszámításra. Ehhez képest az FLM módszer lényege az, hogy egy teljes réteget definiálunk elemi egységként. Így például egy 3 rétegű útpályaszerkezet modell felépítéséhez összesen csak 3 elemre van szüksége az FLM módszerrel. Ezt az összes útpályaszerkezet réteg geometriájának egyszerűsítése, valamint a hullám egyenletek analitikus megoldása teszi lehetővé. Más szóval a rétegen belüli feszültség-hullám terjedés leírása zárt alakban megoldható. A rétegek (a modell elemi egységei) közötti kölcsönhatás és a réteghatárok tulajdonságai a végelem módszerhez hasonlóan kerülnek figyelembevételre (H. Lee 2022).

3.4.2.1. ViscoWave véges réteg program

A hagyományos FLM megoldások közös jellemzője, hogy a hullámegyenletek megoldására a frekvenciatartományban működő analitikus modelleket alkalmaznak, és a diszkrét Fourier-transzformációt (DFT) használják a terhelési és alakváltozási jelek időtartományból frekvenciatartományba történő konvertálására.



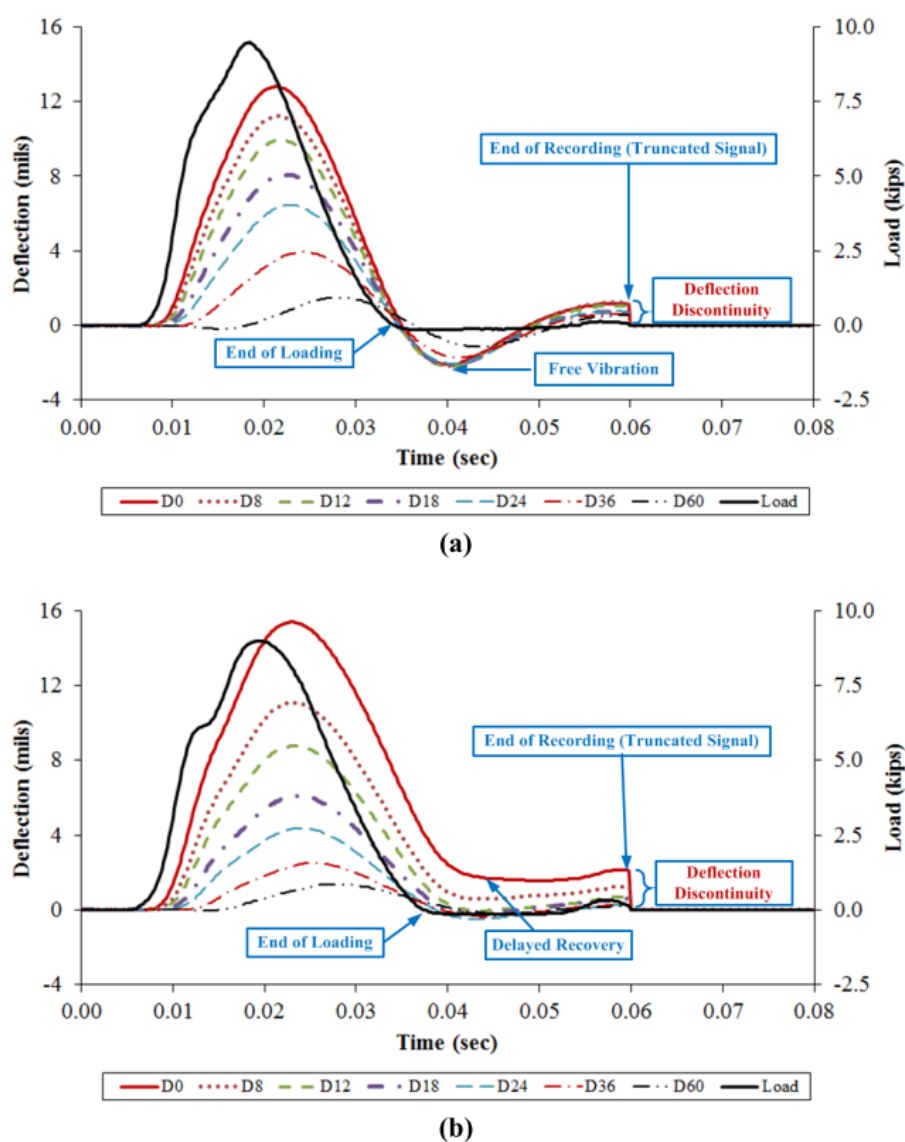
29. ábra. A diszkrét Fourier transzformációt (DFT) használó hagyományos véges réteg módszer (FLM) koncepcionális vázlata (H. Lee 2022).

A 29. ábra koncepcionálisan bemutatja a diszkrét Fourier transzformáció (DFT) használatát a hagyományos FLM-modellekben. A hagyományos FLM három fő lépése a következőképpen írható le (H. Lee 2022):

- 1.) A terhelési jel több, különböző amplitúdójú és frekvenciájú, szinuszos (szinusz és koszinusz függvényekre történő) felbontása DFT-vel.
- 2.) Minden egyes szinuszos terheléshez számítjuk a megfelelő behajlást, amely szintén szinuszos alakú és a terheléssel azonos frekvenciájú.

3.) Összegezve az összes szinuszos terheléshez tartozó behajlásértéket, megkapjuk az eredeti terheléshez tartozó végleges behajlást.

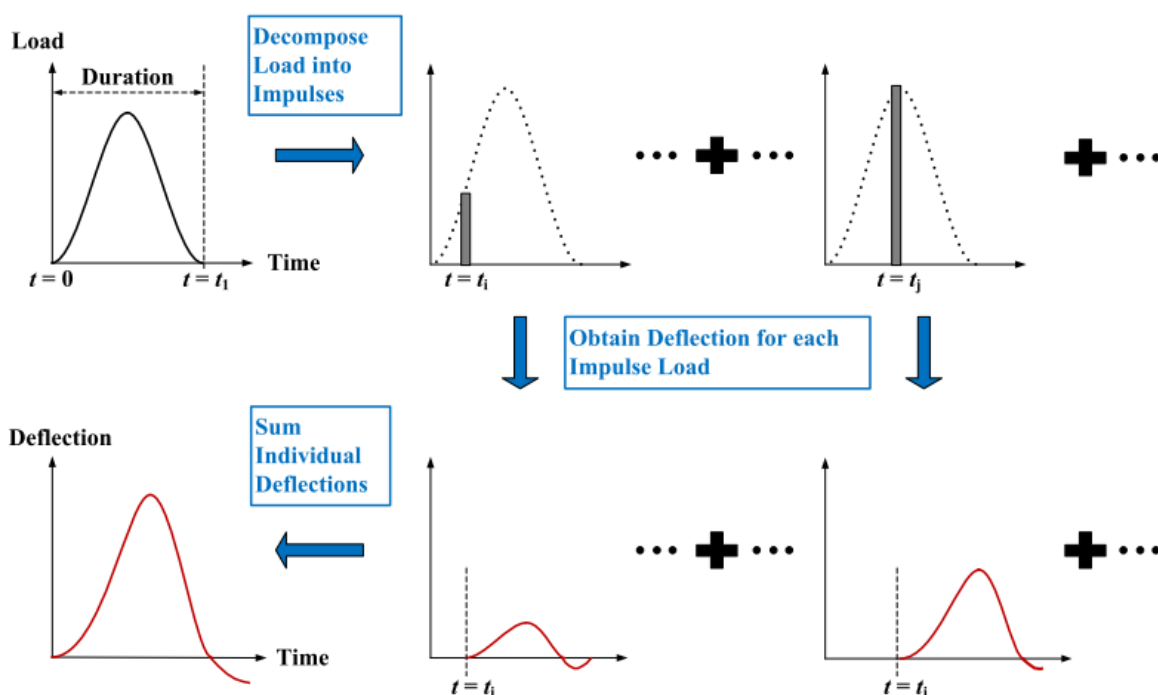
A hagyományos véges-réteg alapuló dinamikus visszaszámító eljárások az ugyancsak a dinamikus útpályaszerkezet modellekkel generált elméleti FWD adatokon a DFT-t használva változó sikerességgel mutattak. A terepi FWD-adatokkal végzett visszaszámítás azonban még ennél is rosszabb volt, általában közepes vagy gyenge sikerességet mutatott. Felismerték, hogy a dinamikus visszaszámítás nehézségei elsősorban abból adódnak, hogy a DFT-t elkerülhetetlenül csonka jeleken kell alkalmazni. A 30. ábra példaként a Hosszútávú Útburkolat Teljesítmény (Long Term Pavement Performance, LTPP) adatbázisból származó tipikus FWD mérés időbeni lefutását mutatja. A 30.a ábra a terhelési időtartam vége után szabadon rezgő alakváltozást, míg a 30.b ábra a terhelést követően lassan helyreálló alakváltozást mutatja (H. Lee 2022).



30. ábra. Tipikus FWD idősorok: a) szabad rezgéssel és b) szabad rezgés nélkül (H. Lee 2022)

Az okoktól függetlenül a 30. ábrán látható mindkét görbe azt mutatja, hogy az alakváltozások a vizsgált időablak végén nem nyugalmi állapotban vannak a jelcsonkítás miatt (azaz az adatrögzítést leállították, mielőtt az alakváltozások visszaálltak volna nullára). A csonka jel szakadást okoz az alakváltozási görbében, aminek kezelése jelentős kihívást jelent a DFT számára.

A DFT-ben a jel szétválasztás (29. ábra) alapját szolgáló folytonos szinuszoidok miatt elméletileg végtelen számú szinuszoidra van szükség egy hasonlóan gyors változás, vagy szakadás lekövetésére. És bár a jelcsonkolás problémájára megoldás lehet a nagyszámú szinuszoid alkalmazása, ez a megoldás jelentősen csökkenti a feldolgozás hatékonyságát.



31. ábra. A ViscoWave számítási koncepció impulzus terhelés és válaszok felhasználásával

A fentiekén kívül a dinamikus visszaszámítás – különösen a terepi FWD adatokon – további kihívást jelentett, hogy a DFT algoritmus a periodicitási feltételezés miatt nem képes pontosan feltárni a tranzien FWD mérési görbék frekvenciatartalmát, és a DFT nagyon érzékeny az FWD adatok zajosságára is.

A közelmúltban (Hyung Suk Lee 2014; Hyung S. Lee 2021) egy új FLM megoldást mutatott be ViscoWave néven, amely a diszkrét transzformációk helyett – mint amilyen a DFT is – folytonos transzformációkkal dolgozik. A folytonos transzformációk használatának elsődleges előnye, hogy lehetővé teszik a terhelés jelének szinuszoidok helyett impulzusokra való felbontását. Amint az a 31. ábrán szematikusan látható, az egyes terhelési impulzusok hatására bekövetkező behajlásokat összegezve kapjuk meg a teljes behajlást. Mivel a ViscoWave megoldása impulzustérhelésen és

impulzusválaszokon alapul, megfelelőbb a tranziens, nem periodikus jelekhez, és nem befolyásolja a jel csonkítása sem.

3.4.2.2. ViscoWave Excel munkafüzet

A ViscoWave program C++ programozási nyelven, míg a grafikus felhasználói felület MS Excel és Visual Basic for Application (VBA) környezetben készült. A programhoz és az Excel munkafüzethez elérhető egy igen részletes kézikönyv, ezért itt most csak a leglényegesebb elemekre térünk ki. A ViscoWave telepítőprogram és a teljes forráskód elérhető a GitHub tárhelyen: <https://github.com/leehyu20/ViscoWave>

Mivel a ViscoWave program felhasználói felületét egy makróval támogatott MS Excel munkafüzetben készítették el, különösen fontos, hogy engedélyezett legyen a VBA nyelven írt makrók vagy kódok futtatása. Telepítés után a Windows Asztalon megjelenő parancsikonnal elindítható a Microsoft Excel alapú ViscoWave program. A parancsikon egy írásvédett sablon fájlt nyit meg, amit más néven szükséges menteni ahhoz, hogy a további munka menthető legyen. A ViscoWave felületén alapértelmezés szerint a következő 5 munkalap látható (H. Lee 2022):

- VW: a főmenü, a direkt számítás és a visszaszámítás lapok
- Default Inputs: az alapértelmezett pályaszerkezet paramétereit (modulus, Poisson-féle tényező, sűrűség, vastagság és csillapítás) és ezek szélső értékeit tartalmazó táblázatok
- Dynamic_Modulus_Calc: segédlap, ahol átkonvertálhatjuk egymás között a relaxációs és a dinamikus modulusokat
- VW_Quick_Start_Gudie: rövid használati útmutató
- AGPL License V3: felhasználói licenc feltételek

Az alábbi két lapot rejtetten tartalmazza a sablon (H. Lee 2022):

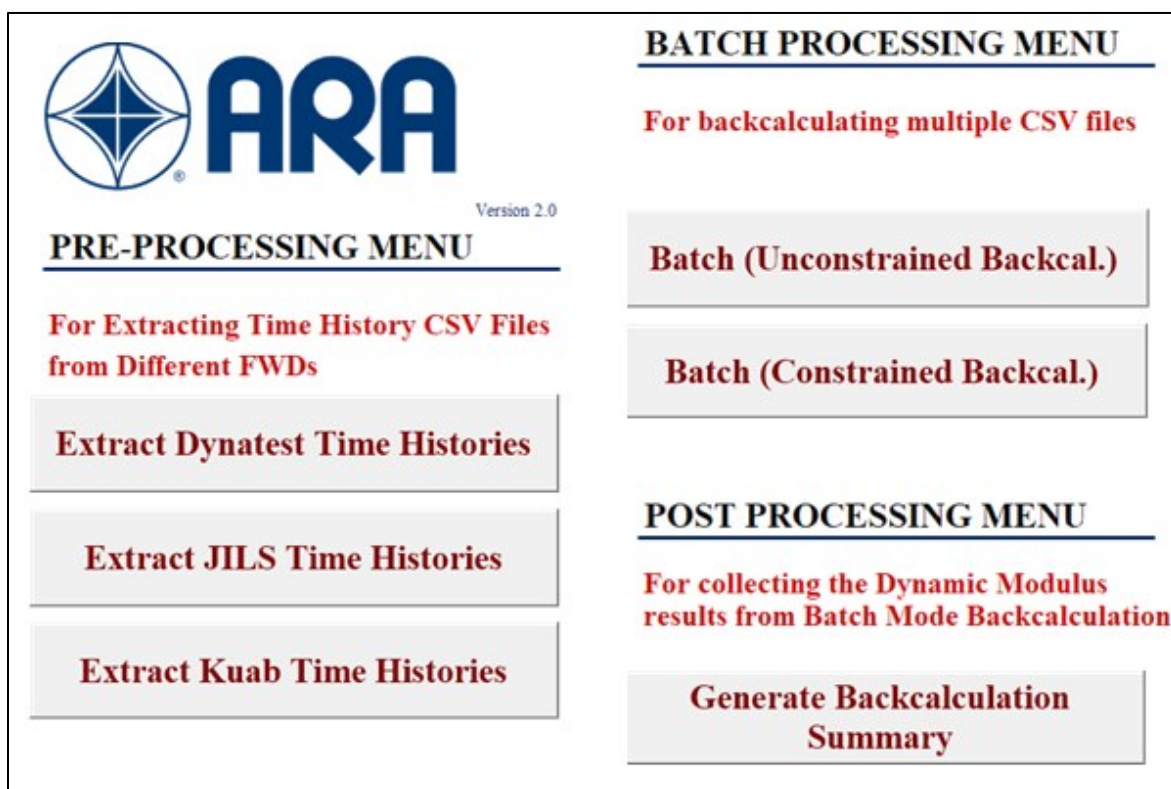
- DM-Summary: a visszaszámítással meghatározott dinamikus modulusok (viszkoelasztikus rétegek esetén) összegzésére szolgáló munkalap
- ElasticLayer_Summary: a visszaszámítással meghatározott rugalmassági modulusok (rugalmas rétegek esetén) összegzésére szolgáló munkalap

A fenti két munkalap csak összegzési célokat szolgál, a felhasználónak nincs teendője velük. Az elemzés menü a VW lapon található, és három menüpontból áll (32. ábra):

- Pre-processing menu: mérési adatok előfeldolgozása
- Batch processing menu: több mérés köteget feldolgozása
- Post processing menu: köteget feldolgozás rendszerezésére szolgáló menü

A Pre-processing menü az FWD mérések előfeldolgozására és a program számára értelmezhető formára alakítására szolgál. Az átalakítás eredménye egy .csv fájl lesz,

amelyet később be lehet olvasni a programba. A program a Dynatest, a JILS és a Kuab formátumát ismeri (H. Lee 2022).



32. ábra. ViscoWave analízis menü

A Dynatest FWD mérési adatok (maximális behajlás, idősor, hőmérséklet stb.) .mdb kiterjesztésű fájlban kerülnek mentésre. A régebbi típusú Dynatest FWD eszközök az .mdb fájlok helyett .fwd, vagy más ASCII formátumot használnak. Jelenleg ezeket a formátumokat nem támogatja a program. Az importálást egy R programnyelven írt script végzi, ezért a ViscoWave telepítésekor érdemes a Portable R telepítése lehetőséget választani. Ennek híján a telepítési mappában található Dynatest.r script futtatásával végezhető el az importálás.

A JILS FWD eszközök a maximális behajlásokat egy .dat kiterjesztésű fájlban, míg az összes ejtés idősorát egy .thy kiterjesztésű fájlban tárolják. A két fájlnak azonos nevet kell adni, és azonos mappába kell helyezni ahhoz, hogy az adatok importálhatók legyenek. Az importáláshoz elegendő csak az egyik fájl kiválasztása. Abban az esetben, ha az importálást saját R környezetben kívánjuk elvégezni, a telepítési mappában található JILS.r scriptet kell lefuttatni.

A Kuab FWD eszközök a maximális behajlás értékeket egy .fwd fájlban, míg az egyes ejtésekhöz tartozó idősorokat .hst fájlban tárolják. Így egy .fwd fájlhoz több .hst fájl tartozhat. Ezeket a fájlokat azonos mappába kell elhelyezni, és az importáláshoz a mappát kell megadni. Abban az esetben, ha az importálást saját R környezetben kívánjuk elvégezni, a telepítési mappában található Kuab.r scriptet kell lefuttatni.

3.4.2.3. Direkt modellezés ViscoWave-vel

A direkt modellezés teljes egészében elvégezhető a program VW lapján. A minimálisan szükséges bemeneti adatok a következők (H. Lee 2022):

General Pavement Structure (Pályaszerkezet jellemzők): modulus (E), Poisson-féle tényező (μ), sűrűség (ρ), vastagság (h) és csillapítás (D). Viszkoelasztikus réteg megadásához az „ E ” értéket állítsuk 0-ra, és a következő táblázatban adjuk meg a relaxációs modulus együtthatóit (33. ábra).

FWD deflection sensors: Az FWD behajlásmérő szenzorok terhelési középponttól mért távolsága inch-ben megadva. A program jelenleg 9 szenzort képes kezelni (34. ábra).

Radius of the load plate: A terhelő tárcsa sugara inch-ben kifejezve. A terhelésre vonatkozó többi adat automatikusan kerül kitöltésre az importált idősorok alapján (35. ábra).

Load (or Force) Time History: Terhelés- és behajlásidősor (36. ábra). Beolvasható az előfeldolgozás eredményeképp kapott .csv fájlból, illetve feltölthető mesterségesen generált adatokkal (fél sinus, haversine, Gauss-görbe).

PAVEMENT STRUCTURE AND MATERIALS																																																				
General Pavement Structure <table border="1"> <thead> <tr> <th>Layer Number</th> <th>E (psi)</th> <th>μ</th> <th>ρ (pcf)</th> <th>h (in)</th> <th>D (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0,35</td> <td>140</td> <td>12,0</td> <td>0,1</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>15000</td> <td>0,40</td> <td>120</td> <td>12,0</td> <td>0,1</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>10000</td> <td>0,45</td> <td>100</td> <td>122,2</td> <td>0,1</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>5</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>6</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						Layer Number	E (psi)	μ	ρ (pcf)	h (in)	D (%)	1	0	0,35	140	12,0	0,1	2	15000	0,40	120	12,0	0,1	3	10000	0,45	100	122,2	0,1	4						5						6						Notation E = Elastic Modulus μ = Poisson's Ratio ρ = Mass Density h = Thickness D = Damping				
Layer Number	E (psi)	μ	ρ (pcf)	h (in)	D (%)																																															
1	0	0,35	140	12,0	0,1																																															
2	15000	0,40	120	12,0	0,1																																															
3	10000	0,45	100	122,2	0,1																																															
4																																																				
5																																																				
6																																																				
						Import Default Pavement		Export to Default Pavement																																												
Note 1: For VISCOELASTIC layers, the Elastic Modulus in the above table must be set to "ZERO" and the Sigmoidal Coefficients provided in the table below. Note 2: For halfspace simulation, specify the thickness of the last layer to be "Zero"																																																				
Sigmoidal Coefficients (Relaxation) <table border="1"> <thead> <tr> <th>Layer Number</th> <th>c1</th> <th>c2</th> <th>c3</th> <th>c4</th> <th>T (°F)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>3,123</td> <td>3,446</td> <td>-0,128</td> <td>0,554</td> <td>68,0</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						Layer Number	c1	c2	c3	c4	T (°F)	1	3,123	3,446	-0,128	0,554	68,0	2						3						Relaxation Modulus Function: $\log E(t) = c_1 + \frac{c_2}{1 + e^{c_3 + c_4 \log(t_r)}}$																						
Layer Number	c1	c2	c3	c4	T (°F)																																															
1	3,123	3,446	-0,128	0,554	68,0																																															
2																																																				
3																																																				

33. ábra. Pályaszerkezet általános jellemzői

FWD DEFLECTION SENSORS																										
Sensor Location (in.) <table border="1"> <thead> <tr> <th>D1</th> <th>D2</th> <th>D3</th> <th>D4</th> <th>D5</th> <th>D6</th> <th>D7</th> <th>D8</th> <th>D9</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>8</td> <td>12</td> <td>18</td> <td>24</td> <td>36</td> <td>48</td> <td>60</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>									D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	0	8	12	18	24	36	48	60	
D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9																		
0	8	12	18	24	36	48	60																			

64. ábra. A szenzorok elhelyezkedése

FWD LOAD SUMMARY			
Load Radius:	6 in.	Peak Load:	8961 lbs
		Peak Pressure:	79,2 psi

35. ábra. A terhelés jellemzői

LOAD AND DEFLECTION TIME HISTORIES											
Note 1: Load Time History must be inputted in the 2nd column highlighted in ORANGE Note 2: Time Increment (dt) must be 0.2 milliseconds (Hard Coded in C++ Code) Note 3: Maximum time should not exceed 0.07 seconds. It is generally recommended not to modify the time column. Note 4: Do NOT modify the Normalized Load History in Column P											
Use Synthetic Load Time History											
Half-Sine Load Begin: 0.005 sec. End: 0.03 sec. Magnitude: 9000 lb Generate Half-Sine Load			HaverSine Load Begin: 0.005 sec. End: 0.03 sec. Magnitude: 9000 lb Generate Haver-Sine Load			Normal Distribution (Gaussian) Centered: 0.018 sec. Std. Dev.: 0.004 sec. Magnitude: 9000 lb Generate Gaussian Load					
Measured Deflections											
Time	Force	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	Temperature
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	68.00
0.0002	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	68.00
0.0004	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	68.00
0.0006	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	68.00
0.0008	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	68.00
0.001	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	68.00
0.0012	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	68.00
0.0014	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	68.00
Clear Measured Time History Import Measured Time History											

36. ábra. Mérési adatok beolvasása

A fenti adatok megadása után az eredmények és az idősor grafikonok automatikusan frissülnek. Generált adatsor esetén a mért adatok idősora nem fog adatpontokat tartalmazni. Végtelen féltér modellezéséhez az utolsó réteg vastagságát 0-ra kell állítani. Megjegyzendő, hogy általában nem tanácsos végtelen féltér alkalmazni visszaszámítás céljára. A végtelen féltér helyett nagyon vastag (3-500 inch) réteget célszerű felvenni (H. Lee 2022).

A program jelenleg 6 réteget (ebből 3 lehet viszkoelasztikus) és 9 behajlásmérő szenzort támogat. Ez a korlát csak a felhasználói felület korlátja, nem pedig az algoritmusé. A Time increment (időnövekmény) (dt) változó értékének 0,2 milliszekundumnak kell lennie, és a maximális idő nem haladhatja meg a 0,06 másodpercet. Általános esetben a „Time” (idő) oszlopot nem célszerű módosítani.

3.4.2.4. Visszaszámítás (egyetlen ejtésből) ViscoWave-vel

Egyetlen FWD idősor visszaszámítása teljes egészében elvégezhető a VW lapon. Ehhez a korábban bemutatott előfeldolgozás lépésben kapott .csv fájlra van szükség. A visszaszámítás a következő lépésekben végezhető el (H. Lee 2022):

- A .csv fájl beolvasása az Import Measured Time History gombbal (36. ábra).

- Pályaszerkezet/anyagtulajdonságok kitöltése és módosítása, amíg a mért értékekhez kellően hasonló eredmény születik (33. ábra).
- Szélső értékek beállítása, amennyiben szükséges Tables for Upper and Lower Bounds táblázatban.
- Rétegmodulus próba visszaszámítása (Run Backcalculation) korlátokkal (Constrained) vagy anélkül (Unconstrained) (37. ábra).
- Amennyiben az eredmény nem kielégítő, úgy a bemenő adatok változtatásával lehet jobb eredményt elérni.
- Amennyiben az eredmény megfelelő, úgy a Default Inputs (alapértelmezett bemeneti adatok) lapra exportálható a megfelelő gomb segítségével.

BACKCALCULATION (UNCONSTRAINED OR CONSTRAINED)

Unconstrained Backcalculation

**Run Backcalculation
(Unconstrained)**

Constrained Backcalculation
(Specify Upper and Lower Bounds in the Tables Below)

**Run Backcalculation
(Constrained)**

Tables for Upper and Lower Bounds
General Pavement Structure

Layer Number	E (psi)		μ		ρ (pcf)		h (in)		D (%)	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	5000	35000	-	-	-	-	-	-	-	-
3	4000	15000	-	-	-	-	50,0	200,0	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Note: The cells for upper and lower bounds of Poisson's ratio, unit weight, and damping are reserved for future updates and advanced users

Sigmoidal Coefficients (Relaxation)

Layer Number	c1		c2		c3		c4	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
1	2,500	4,000	3,000	4,500	-	-	0,500	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-

37. ábra. Visszaszámítás menü

4. A szükséges erősítőréteg vastagság meghatározása

A hajlékony útpályaszerkezetek erősítőrétegének méretezése a szabványos terhelés hatására bekövetkező alakváltozások mérésén és kiértékelésén alapul. További fontos adat a tervezési forgalom nagysága (TF), amire az erősítőréteget méretezzük. Behajlasmérésre csak akkor kerülhet sor, ha a régi szerkezet burkolata nem repedezett jelentősen és a földmű anyaga nincsen elázva.

4.1. Helyszíni vizsgálatok

A behajlasmérésre ma már csak azok az eszközök javasolhatók, amelyek alkalmasak arra, hogy automatikusan rögzítsék a szabványos terhelést és a szerkezetnek erre adott válaszát (behajlását) az idő függvényében. Ezért fontos, hogy az FWD berendezések ne csak az egyes érzékelőknél jelentkező maximális elmozdulásokat, hanem a teljes alakváltozási idősort eltárolják. A behajlási idősorokon túl, szükséges a levegő és az aszfaltburkolat hőmérsékletének mérése is, hogy a már bemutatott számítási eljárásokat használni tudjuk. A behajlásértékek ismeretén túl, fel kell mérni vizuálisan az aszfaltburkolat felületállapotát pl. hosszirányú egyenetlenség, nyomvályú mélység, repedezettség, kátyúk stb. Ezekkel az állapotjellemzőkkel jelen anyagban részletesen nem foglalkozunk, de a tényleges felújítási technológia szempontjából rendkívül fontosak. A helyszíni bejárás, állapotértékelés és behajlasmérés követően az első feladatunk, hogy az azonos forgalmú útvonalrészeket egyenteherbírású homogén szakaszokra bontsuk.

4.2. Azonos teherbírású útszakaszok

A hajlékony pályaszerkezetek megerősítés méretezésének fontos momentuma a tervezési útszakasz homogén szakaszokra bontása. Erre azért van szükség, mert a több ütemben végrehajtott útépités (pl. szélesítés) miatti változatos pályaszerkezet, a felújításokkor alkalmazott különböző technológiák, vagy éppen az eltérő altalaj az út tengelye mentén a pályaszerkezet teherbírásának inhomogenitását eredményezheti. A hasonló teherbírású szakaszokat tekintjük homogén szakaszoknak. A homogén szakaszon belül azonos vastagságú megerősítést alkalmazunk!

A jelenleg érvényben lévő szabályozásunk (ÚT 2-1.202 2005) szerint a tervezési szakasz homogén szakaszokra bontását a rögzített és korrigált behajlásértékek alapján javasolja végrehajtani. Jelen módszer megköveteli a teljes behajlási teknő felvételét minden mérési pontban. A Geobeam, ABBA, Lacroix-deflectográf és Curviameter mérőberendezések eredményeit a terhelési sebesség miatt kvázi statikusnak tekintjük, ezért a mért deformációs vonalból a rétegvastagságok ismeretében a 3.4.1 pontban ismertetett ELLVA1 munkafüzettel tudjuk visszaszámítani a rétegjellemzőket. Az aszfaltrétegre visszaszámolt $D(t)$ mestergörbét pedig átalakítjuk dinamikus modulus

mestergörbévé a ELiCon v0.1 munkalappal. Az impulzus alapú FWD berendezéseknél a teljes terhelési- és alakváltozási idősort rögzítjük és a 3.4.2 pontban ismertetett ViscoWave munkafüzettel visszaszámítjuk az aszfaltréteg $E(t)$ relaxációs modulusát, amit ugyancsak dinamikus modulus mestergörbévé alakítunk. Mivel a helyszíni mérések egy pillanatnyi, aktuális aszfalthőmérséklethez tartoznak, azokat még korrigálni kell a referencia hőmérsékletre. Mivel Magyarországon a méretezési hőmérséklet 20°C, ezért a meglévő aszfaltréteg dinamikus modulus értékét 10 Hz fázadási frekvenciánál olvassuk le a behajlási teknőből visszaszámolt mestergörbéről, felhasználva (20) egyenletet. Általánosan elfogadott, hogy a szemcsés anyagból épült pályaszerkezeti rétegek és a földmű nem érzékenyek a hőmérséklet hatására, ezért a visszaszámított modulusok hőmérséklet korrekciójára sincsen szükség.

A terhelési idővel és a hőmérséklettel korrigált behajlást megkapjuk, ha a rétegvastagságokat és a visszaszámolt rétegmodulusokat felhasználva a szabványos kerékterhelésre kiszámítjuk (lásd később) a központi behajlást az ELLEA1 munkafüzettel vagy a WESLEA programmal. A továbbiakban ezzel a számított modell behajlásértékkel dolgozunk. Az eljárás egyébként a statikus-dinamikus behajlásértékek átszámításának kérdését is kezeli egyben.

A kumulatív-szomma módszer lényege, hogy egy idősor választott célértékének az egyes mérési adatoktól való eltérését összegzi. A célértéknek leggyakrabban az adatsor átlagértékét, vagy egy beavatkozási küszöbszint értékét választják. A kumulált összegek az alábbiak szerint határozhatók meg (21. egyenletek):

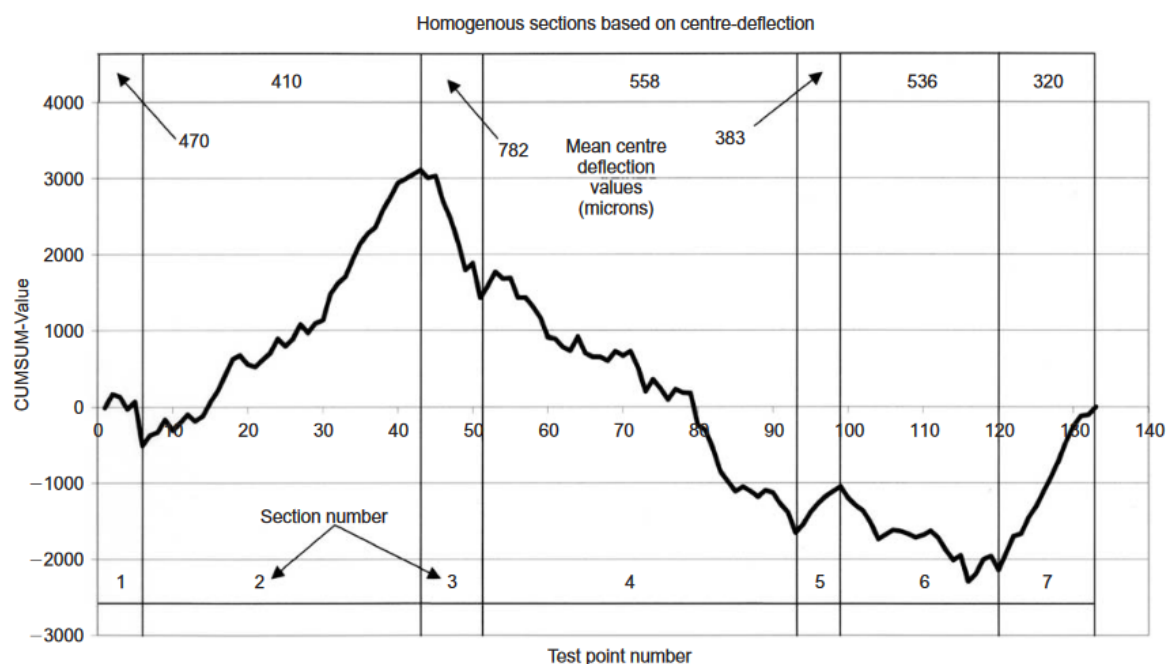
$$\begin{aligned} S_1 &= x_1 - x_m \\ S_2 &= x_2 - x_m + S_1 \\ S_i &= x_i - x_m + S_{i-1} \end{aligned}$$

ahol x_i az i . mérési pontban mért adat, x_m a vizsgált szakasz választott célértéke, S_i az i . mérési pontban a célértéktől mért eltérések kumulált összege. Az eredmények összeggörbéjének ábrázolása után a görbe iránytörésének figyelembevételével állapíthatók meg a homogén szakaszok (38. ábra). A görbére illeszthető trendvonalak irányának jelentése:

- közel vízszintes: a mért értékek a célérték közelében vannak (0),
- csökkenő: a mért értékek a célértéktől rosszabbak (–),
- növekvő: a mért értékek a célértéktől jobbakk (+).

A kumulált-szomma módszerrel a vizsgált szakasz mindig minimum két alszakaszra bontható. Minden CUSUM-görbe különbséggel kezdődik és nullában végződik, közte minimum egy markáns csúcs vagy töréspont van.

A számított központi behajlással gyorsan elvégezhető a homogén útszakaszok lehatárolása, de az erősítőréteg méretezésére már nem használjuk fel.



38. ábra. Tipikus CUSUM-görbe a homogén szakaszok lehatárolásához (Pearson 2012)

Ennek oka, hogy a központi behajlás a teljes útpályaszerkezetet jellemzi, nem pedig csak a felső aszfaltréteget. Sokkal több információt hordoznak a visszaszámított rétegmodulusok. Az útpályaszerkezetet felépítő rétegek E-modulusát külön-külön javasolt hossz-szelvényen ábrázolni, és ezek alapján meghatározni az egyes homogén útszakaszokra az ún. mértékadó értékeket, amik alapján a méretezési modellt összeállítjuk. A mértékadó modulus értékek számítása a következő összefüggés szerint történik:

$$E_m = \bar{E} - \lambda \cdot \sigma_E \quad (22)$$

ahol E_m a mértékadó tervezési modulus, $\bar{E}$ a visszaszámolt rétegmodulusok átlaga, λ megbízhatósági szorzó (2,5% kockázatnál $\lambda = 2$; 5% kockázatnál $\lambda = 1,64$; és 10% kockázatnál $\lambda = 1,28$), és σ_E a visszaszámolt rétegmodulusok szórása.

4.3. Méretezési modell összeállítása

A kumulatív-szomma módszerrel lehatárolt homogén útszakaszokra összeállítjuk a vizsgált szerkezet mechanikai modelljét a rétegvastagságok és a visszaszámolt rétegmodulusok mértékadó értékei alapján. A szabványos kerékterhelés nagysága 50 kN, ami egy 0,15 m nagyságú körleapon egyenletesen megoszló q erőrendszerként kerül figyelembevételre. A modellel a terhelés tengelyében kiszámítjuk a meglévő aszfaltréteg aljának ε_t vízszintes nyúlását, valamint a földműszint függőleges ε_v összenyomódását. A számított igénybevételekkel megjósolható az útpályaszerkezet élettartama a fáradási repedések és a nyomvályúsodás szempontjából. A számítások elvégezhetőek a WESLEA programmal vagy az ELLEA1 Excel munkafüzettel.

4.4. Hátralévő élettartam számítás

A vizsgált útszakasz homogén szakaszainak hátralévő élettartalmát az egyes igénybevételekre kidolgozott ún. empirikus teljesítményegyenletekkel tudjuk megbecsülni. Ezeknek az élettartam becslő modelleknek a bementét adják a mechanikai modellel kiszámított igénybevételek.

A klasszikus megközelítés szerint az ismétlődő kerékterhelés hatására keletkező hajlító-húzófeszültségek fáradási repedéseket okoznak az aszfaltrétegek alsó szálában. Ezért a fáradási élettartam szempontjából a legfelső pályaszerkezeti réteg alsó szálában ébredő maximális vízszintes (ε_t) fajlagos alakváltozást (megnyúlást) tekintjük mértékadónak. Fáradási modellnek javasolható a Primusz és Tóth (2018) munkájában közölt Shell-féle összefüggés:

$$N_f = \frac{F}{SF} \left[\frac{10^4 \cdot (0,856 \cdot V_b + 1,08)}{E_{AC}^{0,36} \cdot \varepsilon_t} \right]^5 \quad (23)$$

ahol

- N_f = 100 kN-os egységtengely áthaladási szám [db]
- V_b = a bitumen térfogata 11-13 [%]
- E_{AC} = az aszfaltréteg modulusa [MPa]
- ε_t = a számított vízszintes fajlagos megnyúlás [μ strain]
- SF = a shiftfaktor
- F = a biztonsági tényező

Shift faktor (SF) értéke:

- kötőanyag nélküli (szemcsés) alsó alapréteg (FZKA): $SF = 3,00$
- hidraulikus (cement) kötőanyagú alsó alapréteg (CK_t): $SF = 2,50$
- bitumen kötőanyagú (aszfaltbeton) alsó alapréteg (AC): $SF = 5,00$

A hagyományos és a modifikált kötőanyagú aszfaltkeverékek közötti különbséget egy ún. biztonsági tényező (F) bevezetésével tudjuk figyelembe venni:

- hagyományos útépitési bitumen (normál): $F = 1,00$
- polimerrel módosított bitumen (PmB): $F = 1,50$

A földmű kifáradásáról akkor beszélünk, ha az ismétlődő kerékterheléséből származó (a pályaszerkezet által már lecsökkentett) nyomófeszültségek olyan magasak, hogy az a legalsó réteg maradandó deformációját okozza. Ezek a deformációk a burkolat felszínén nyomvályúk formájában jelentkezhetnek.

A földmű összenyomódás kritériumra – lévén nem állnak rendelkezésre releváns hazai kutatási eredmények – a belga CRR útügyi kutatóintézet módosított (szigorúbb) összefüggése javasolható:

$$\log(N_d) = -4.3478 \cdot \log(\varepsilon_v) + 16.427 \quad (24)$$

ahol

N_d : 100 kN-os egységtengely áthaladási szám [db]

ε_v : a számított függőleges fajlagos összenyomódás [μstrain]

Ezek után az útpályaszerkezet maradó élettartamát megkapjuk, ha az N_f és N_d 100 kN-os egységtengely áthaladási számokat összehasonlítjuk a tervezési forgalommal. Ha bármelyik érték kisebb, mint a tervezési forgalom, akkor megerősítésre van szükség.

4.5. A méretezés végrehajtása

Hajlékony útpályaszerkezeteknél tulajdonképpen két fő méretezési kritériumot alkalmazunk: a fáradási és az altalaj-összenyomódási kritériumot. A fáradási (repedési) kritérium szerint az aszfaltrétegek alsó szálában ébredő vízszintes ε_t fajlagos megnyúlás a fáradási nyúlásnál kisebb legyen:

$$\varepsilon_t \leq \varepsilon_f(TF) \quad (25)$$

ahol $\varepsilon_f(TF)$ a megengedett fáradási nyúlás, ami a tervezési élettartam előrebecsült nehéz teherforgalmából számított TF egységtengely-áthaladási számnak függvénye.

Ha a számított – mértékadó – igénybevétel nagyobb, mint a – megengedett – határigénybevétel, vagyis $\varepsilon_t \geq \varepsilon_f(TF)$, akkor a szerkezet NEM fel meg, a vizsgált útszakasz homogén szakaszán erősítőréteget kell betervezni, vagy annak vastagságát növelni szükséges. A módosított mechanikai modellel újra kiszámítjuk ε_t értéket egészen addig, amíg (25) feltétel nem teljesül. Minden iteráció után természetesen a földmű összenyomódás kritériumot is ellenőrizni kell.

Ha a számított – mértékadó – igénybevétel kisebb, mint a – megengedett – határigénybevétel, akkor a szerkezet mechanikai szempontból MEGFELEL, és a túlméretezés ellenőrzése után a rétegvastagságokat véglegesíteni kell az alkalmazott technológiának megfelelően. A mechanikai modellben az aszfalt erősítőréteg E-modulusát a 3. táblázat szerint javasolt megválasztani.

3. táblázat. A méretezéshez használható aszfaltmodulusok (Primusz és Tóth 2018)

Aszfalt réteg	Egyenértékű aszfalt modulus [MPa] 20°C	Aszfaltkeverék bitumen térfogata [%]	Poisson-tényező
Kopó	4 000	12,8	0,35
Kötő	5 800	11,4	0,35
Alap	4 500	11,0	0,35

5. Összefoglalás

A hajlékony útpályaszerkezetek megerősítésének méretezése elsősorban a behajlásmérésen alapul. Behajlásmérésre többféle mérőberendezést használhatunk, mindegyiknek megvan – műszaki szempontból – a maga előnye és hátránya. Közös jellemzőjük, hogy a mért deformációs vonalból visszafele tudunk következtetni az útpályaszerkezetet alkotó rétegek anyagi tulajdonságaira. Az eljárás lényege, hogy a visszaszámítás alatt a mért felületi alakváltozást megpróbáljuk (bizonyos tűrhető hibán belül) összehasonlítani egy azonos felépítésű útpályaszerkezet modell feltételezett rétegmerevségeinek (modulusainak) felhasználásával számított felületi alakváltozásával. Ahhoz viszont, hogy a visszaszámított anyagi jellemzők valóság legyenek, olyan mechanikai modellt kell alkalmaznunk, ami a lehető legjobban megfelel a mérőeszköz működési elvének és a vizsgált útpályaszerkezet felépítésének is. Ezért ebben a mérnöki segédletben először áttekintettük a leggyakoribb behajlásmérő berendezések működési elvét, majd röviden ismertettünk két mechanikai modellt: a kvázi statikus kerékterhelést és az impulzus alapú, dinamikus. Mindkettő módszer az aszfaltréteg anyagi tulajdonságait az ún. $D(t)$ vagy $E(t)$ mestergörbével veszi számításba.

A reológia ismert összefüggése alapján a kúszási engedékenység, a relaxációs modulus és a dinamikus modulus mestergörbék egymásba oda-vissza átszámíthatóak, így, ha az egyiket ismerjük, akkor a másik kettőt is. Ez lehetővé teszi, hogy a különféle berendezéssel mért behajlások információtartalmát egy egységes útpályaszerkezet modellben összefoglaljuk. Ennek a személetnek az egyik „mellékterméke”, hogy automatikusan megszűnik a statikus és a dinamikus behajlások átszámításának problémája. A mérnöki segédlet ezért röviden kitér az aszfaltkeverékek viszkoelasztikus jellemzésére, az idő-, a frekvencia- és a hőmérséklet függő viselkedésére, valamint a számítások elvégzéséhez ingyenes letölthető Excel munkalapokat is bemutat.

A megerősítés méretezésnél már egy egyszerűbb, ún. egyensúlyi állapotban lévő útpályaszerkezet modellel dolgozunk, ahol a meglévő aszfaltréteg teherbírását a 20°C-os dinamikus modulus mestergörbéről a 10 Hz-es frekvenciánál olvassuk le. Az erősítőréteg vastagságát egészen addig növeljük, míg a meglévő aszfaltréteg alján az ún. fáradási, és a földműtűkör tetején az ún. nyomvályúsodási kritériumok nem teljesülnek.

6. Irodalomjegyzék

- Ambrus, Kálmán. 2001. „Ejtősúlyos teherbírás-méréseken alapuló új útburkolat-erősítés méretezési eljárás kidolgozása”. *Közúti és mélyépítési szemle* 51 (3): 90–97.
- Ambrus, Kálmán, és Géza Bartha. 1999. „Tömör emlékeztető néhány aktuális aszfaltmechanikai fogalomra és eljárásra”. *Közúti és mélyépítési szemle* 49 (7–8): 301–9.
- Anderson, Steven. 2009. „Pavement Deflection Measurements Using the Geobeam”. Előadás Mechanistic Design and Evaluation of Pavements, Auckland, NZ. <http://www.pavementanalysis.com/images/presentations/pdf/Geobeam.pdf>.
- Baksay, János. 1976. „Útpályaszerkezetek behajlásmérése automatikus mérőkocsival”. *Mélyépítéstudományi Szemle* XXVI (12): 529–36.
- Bodor, Géza, és László Mihály Vas. 2000. *Polimer anyagszerkezettan*. 2. kiad. Budapest: Műegyetemi Kiadó.
- Boromisza, Tibor. 1959. „Útburkolatok behajlása”. *Mélyépítéstudományi szemle* 9 (12): 564–71.
- . 1976. „Aszfaltburkolatú utak teherbírásának vizsgálata behajlásméréssel”. *Mélyépítéstudományi szemle* 26 (12): 521–28.
- . 1993. „Útpályaszerkezetek dinamikus teherbírásmérésének bevezetése”. *Közlekedésképzési- és Mélyépítéstudományi Szemle* XLIII (9): 327–37.
- . 1997. „Útpályaszerkezetek teherbírásmérése és az értékelés jelenlegi hazai gyakorlata”. *Közúti Közlekedés- és Mélyépítéstudományi Szemle* XLVII (3): 142–44.
- Boromisza, Tibor, és Dahbi Abdelaziz. 1980. „Ejtősúlyos berendezés az aszfaltanyagok dinamikus rugalmassági modulusainak laboratóriumi vizsgálatára”. *Mélyépítéstudományi Szemle* 30 (12): 547–55.
- Dähnert, Matthias. 2005. „Messwertgestützte Ermittlung der Tragfähigkeit von bestehenden Strassen”. Diplomarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen.
- Gáspár, László. 1968. *Mérnöki szerkezetek vizsgálata*. Tankönyvkiadó, Budapest.
- . 2003. *Útgazdálkodás*. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Karoliny, Márton. 2015. „HASTA LA VISTA CURVIAMETRO!” *Útügyi Lapok* (blog). 2015. 02. <https://utugyilapok.hu/2015/09/hasta-la-vista-curviametro/>.
- Kim, Minkyum, Louay N. Mohammad, és Mostafa A. Elseifi. 2015. „Effects of Various Extrapolation Techniques for Abbreviated Dynamic Modulus Test Data on the MEPDG Rutting Predictions”. *Journal of Marine Science and Technology* 23 (3): 353–63. <https://doi.org/10/gfxr36>.
- Kosztka, Miklós. 2009. *Erdészeti útéptetés - Erdészeti utak építése*. Budapest: Országos Erdészeti Egyesület (OEE).
- Kosztka, Miklós, Gergely Markó, József Péterfalvi, Péter Primusz, és Csaba Tóth. 2008. „Erdészeti utak teherbírásának mérése”. In *A Magyar Tudományos Akadémia, Agrártudományok Osztálya, Agrárműszaki Bizottság, XXXII. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás előadásainak és konzultációs témáinak összefoglalói*, szerkesztette László Tóth és László Magó, 3:75–79. Gödöllő: SZIE.
- Kutay, M. Emin, Karim Chatti, és Ligang Lei. 2011. „Backcalculation of Dynamic Modulus Mastercurve from Falling Weight Deflectometer Surface Deflections”. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2227 (1): 87–96. <https://doi.org/10/fkdhww>.

- Lee, Hyung. 2022. „ViscoWave Documentation and User Guide”. In , 45. Champaign, Illinois: Applied Research Associates - ARA. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22910.25924>.
- Lee, Hyung S. 2021. „ViscoWave – An Open Source Program for Dynamic, Viscoelastic Analysis of FWD Data”. Oral előadás Virtual FWD User Group Meeting, október.
- Lee, Hyung Suk. 2014. „ViscoWave – a New Solution for Viscoelastic Wave Propagation of Layered Structures Subjected to an Impact Load”. *International Journal of Pavement Engineering* 15 (6): 542–57. <https://doi.org/10/gphpbz>.
- Levenberg, Eyal. 2013. „Inverse Analysis of Viscoelastic Pavement Properties Using Data from Embedded Instrumentation”. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 37 (9): 1016–33. <https://doi.org/10/fzkm35>.
- . 2016a. „ELLEA1: Isotropic Layered Elasticity in Excel: Pavement analysis tool for students and engineers”. <https://orbit.dtu.dk/en/publications/ellea1-isotropic-layered-elasticity-in-excel-pavement-analysis-to>.
- . 2016b. „ELLVA1: Isotropic Layered Viscoelasticity in Excel (moving load): Advanced pavement analysis tool for students and engineers”. <https://orbit.dtu.dk/en/publications/ellva1-isotropic-layered-viscoelasticity-in-excel-moving-load-adv>.
- . 2016c. „Viscoelastic Pavement Modeling With a Spreadsheet”. In , 746–55. Research Publishing Services. <https://doi.org/10.3850/978-981-11-0449-7-132-cd>.
- . 2018. „ELiCon: Real-Time Viscoelastic Interconversion in the Time and Frequency Domains”. MS Excel. Technical University of Denmark. <https://www.academia.edu/35945069/ELiCon>.
- Levenberg, Eyal, és Jacob Uzan. 2007. „Uniqueness of the Viscoelastic Time-Function for Asphalt-Aggregate Mixes”. In *International Conference on Advanced Characterization of Pavement and Soil Engineering Materials, Athens*.
- Lytton, Rl. 1989. „Backcalculation of Pavement Layer Properties”. In *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli*, szerkesztette Gy Baladi és Aj Bush, 7-7–32. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/STP19797S>.
- Markó, Gergely, Péter Primusz, és József Péterfalvi. 2012. „Erdészeti utak teherbírásának mérése a továbbfejlesztett kézi behajlásmérővel”. *Erdészettudományi Közlemények* 2 (1): 107–21.
- . 2013. „A Benkelman-tartó továbbfejlesztése a behajlási teknő automatizált rögzítéséhez”. *Útügyi Lapok* 1 (1): 109.
- Md. Yusoff, Nur Izzi, Emmanuel Chailleux, és Gordon Airey. 2011. „A Comparative Study of the Influence of Shift Factor Equations on Master Curve Construction”. *International Journal of Pavement Research and Technology* 4 (6): 324–36.
- Painter, Paul C., és Michael M. Coleman. 1997. *Fundamentals of Polymer Science: An Introductory Text*. 2nd ed. Lancaster, Pa: Technomic Pub. Co.
- Pearson, Derek. 2012. *Deterioration and Maintenance of Pavements*. London: ICE Publishing.
- Pellinen, Terhi K., Matthew W. Witczak, és Ramon F. Bonaquist. 2003. „Asphalt Mix Master Curve Construction Using Sigmoidal Fitting Function with Non-Linear Least Squares Optimization”. In *Recent Advances in Materials Characterization and Modeling of Pavement Systems*, 83–101. Columbia University, New York, United States: American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/40709\(257\)6](https://doi.org/10.1061/40709(257)6).
- Primusz, Péter, és Csaba Tóth. 2009. „A behajlási teknő geometriája”. *Közlekedésepítési szemle* 59 (12): 18–24, 28.

- . 2018. „Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek egyszerűsített analitikus méretezése”. *Közlekedéstudományi szemle* 68 (5): 17–33. <https://doi.org/10.24228/KTSZ.2018.5.2>.
- Rabaiotti, Carlo. 2008. „Inverse Analysis in Road Geotechnics”. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005774018>.
- Rowe, Geoffrey M., és M. J. Sharrock. 2011. „Alternate Shift Factor Relationship for Describing Temperature Dependency of Viscoelastic Behavior of Asphalt Materials”. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2207 (1): 125–35. <https://doi.org/10/b7wq7q>.
- Sakhaeifar, Maryam S. 2011. „Development of New dynamic modulus (E^*) predictive models for Hot Mix asphalt mixtures”. PhD Thesis, Raleigh, NC: North Carolina State University.
- Schapery, Richard. 1962. „Approximate Methods of Transform Inversion for Viscoelastic Stress Analysis”. In *Proceedings 4th US National Congress on Applied Mechanics*, 2:1075–84. Berkely, USA.
- Shahin, M. Y. 2005. *Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots*. Second. Springer Science+Business Media, New York.
- Simonin, J-M, V. Le Boursicaud, és P. Hornych. 2021. „Correction of Deflection Bowls Measured by Rolling Devices Using Simple Shape Function”. *Transportation Engineering* 3 (március): 100050. <https://doi.org/10/gkt6vj>.
- Smith, Thor L. 1971. „Empirical Equations for Representing Viscoelastic Functions and for Deriving Spectra”. *Journal of Polymer Science Part C: Polymer Symposia* 35 (1): 39–50. <https://doi.org/10.1002/polc.5070350105>.
- Szalai, József. 1994. *A faanyag és faalapú anyagok anizotróp rugalmasság- és szilárdságtana. A mechanikai tulajdonságok anizotrópiája*. 1. Sopron: Erdészeti és Faipari Egyetem.
- Tímár, József, és Gábor Major. 2017. „Az útburkolatok állapotának felmérése új vizsgálati módszerek segítségével”. Oral előadás MINNOTECH 2017, Velence. <http://t7hungary.eu/wp-content/uploads/2017/05/MINNOTECH-2017-hun.pdf>.
- Tóth, Csaba, és József Tóth. 2008. „Útpályaszerkezetek roncsolásmentes diagnosztikai lehetőségei”. *Közúti és Mélyépítési Szemle* 58 (5–6): 10–15.

A sorozat keretében eddig megjelent kiadványok

2017.

1.	NÉMETH András, MILÁVE CZ Richárd	Iparban használatos vízminőségek
2.	SZILÁGYI Zsombor Dr, SZUNYOG István Dr.	Mérések a gáziparban
3.	BARNA Lajos Dr., EÖRDÖGHNÉ MIKLÓS Mária Dr., SZÁNTHÓ Zoltán, BALLA József Dr.	A biztonságos ivóvízellátás megteremtésének tervezési eszközei
4.	BORBÁS Lajos Dr.	Felépítés elvű (additív) gyártástechnológiák a gépészetben
5.	BERENCSI Miklós, BEREZKY Ákos, HORVÁTH László, KOVÁCS Gergely, MIHÁLFY Krisztina	Kerékpárosbarát közlekedéstervezés
6.	TÜDŐS Tibor, VARJÚ György Dr., PETRI Kornél Dr., GÁBOR András	A csillagpontkezelés legújabb külföldi és hazai eredményei (Útmutató és tervezési segédlet)
7.	GARBAI László Dr., JASPER Andor Dr., VÁRADI András	Fűtési és használati melegvíz-igények kockázati elvű méretezése példákkal
8.	KÁDI Ottó, DOHÁNY Máté, JÓZSA Bálint, LÁSZLÓ Csaba Tibor, JAKKEL Ottó	A közúti vasutak (villamos) tervezésével kapcsolatos kézikönyv

2018.

9.	BLAZSOVSZKY László	A gázfogyasztó készülékek égéstermék elvezetésével kapcsolatos szabályozások hiányosságai és ellentmondásai
10.	CSORDÁS Szilveszter, FORGÁCS Lajos Dr., PÓLYA Endre ifj., RÉV Zoltán, UDVARDY Péter	Orvostechnológiai továbbképzés ismeretanyaga
11.	NÁDASDY Tamás, EGYHÁZY Zita, KOVÁCS Ákos Sándor, SZECSŐ Dániel Géza	A közúti biztonsági audit (KBA) jelentések elkészítésének alkalmazási segédlete – A közúti infrastruktúra közlekedésbiztonsági kezeléséről szóló jogszabályhoz és ütügyi műszaki előíráshoz kapcsolódó értelmezési, kidolgozási és elfogadtatási javaslatrendszer
12.	SZILÁGYI Zsombor Dr., HORÁNSZKY Beáta	Földgáz kereskedelem (mérnöki segédlet)
13.	SZILÁGYI Zsombor Dr.	Az energiahordozók jövője – kőolaj, földgáz, megújulók
14.	S. VÍGH Judit, DOHÁNY Máté	Magános közlekedők baleseti súlyosságának csökkentése mobil applikáció segítségével
15.	BALIKÓ Sándor Dr., CSÜRÖK Tibor Dr., NOVÁK Dániel, ORBÁN Tibor, ZSEBIK Albin Dr.	Ötletlapok I. – Energiahatékonyság növelő ötletek egyszerű energetikai és gazdasági számításai
16.	DARABOS Zoltán, KOLTAI Henrik, SZABÓ Tamás, SZÁSZ Béla, VAJDA Sándor	Felvonók felújítása és átalakítása – Műszaki segédlet
17.	TÜDŐS Tibor, KRUPPA Attila	Alapozásföldelők új tervezési elvei és kivitelezési módszerei – Tervezési segédlet és kivitelezési útmutató
18.	FENYVESI Zsolt	Tűzvédelmi tervek tartalmi szabályainak átdolgozása

- | | | |
|-----|--|---|
| 19. | GÁBORI László Dr., BEINSCHRÓTH József Dr., NÓGRÁDI Gábor, RÁTKAY Tamás | Nagyméretű informatikai beruházásoknál (fejlesztéseknél) ajánlott szoftveroldali tervdokumentációk tartalmi elemeinek meghatározása (I. – II. kötet) |
| 20. | DIVÓS Ferenc Dr. | Az élő fák stabilitása – mérnöki megközelítés – Élő fák, mint teherhordó faszerkezetek |
| 21. | KARÁCSONYI Zsolt Dr. | Faanyagok tartós szilárdsága |
| 22. | BARNA Lajos Dr., ERDEI István, JASPER Andor Dr., TAKÁCS Gyula | Segédlet épületek csatorna-berendezéseinek tervezéséhez |
| 23. | ANTÓK Péter István, FÜZÉR Ferenc, SÁRKÖZI András | Fényvezető kábelszakaszok műszaki-minőségi ajánlás gyűjteménye |
| 24. | JANCsó Béla, KULCSÁR Alexandra Dr., NÉMETH Gábor, VÍMI Zoltán Dr., DÉRI Lajos, SZIMANDEL Dezső | Vízjogi engedélyezési eljárással kapcsolatos dokumentációk és engedélyeztetéssel kapcsolatos követelmények a 2018.01.01-én hatályba lépett 41/2017. (XII.29.) BM rendelet alapján |
| 25. | TAKÁCS Bence Dr., SIKI Zoltán Dr., ÉGETŐ Csaba Dr., BÉNYI László | Mérnökgeodéziában alkalmazott alapponthálózatok – A jó gyakorlat bemutatása mintapéldákkal |
| 26. | MÓCZÁR Balázs Dr., LAUFER Imre, TÓTH Gergő, WOLF Ákos | Korszerű támszerkezetek tervezése |
| 27. | HALÁSZ Györgyné Dr., CSERVENYÁK Gábor, TUCZAI Attila, VIRÁG Zoltán | Különböző funkciójú épületek klimatechnikája II. |
| 28. | KÁDI Ottó, JÓZSA Bálint | Kerékpáros balesetek létesítmények szerinti vizsgálata |
| 29. | GARBAI László Dr., JASPER Andor Dr., PELLER József Bendegúz | Hőteljesítményátviteli tényező alkalmazása távhőrendszerek optimális szabályozásának modelljében |
| 30. | GARBAI László Dr., SÁNTA Róbert Dr., JASPER Andor Dr. | A kompresszoros hőszivattyúk optimalizálása – Tervezés és üzemeltetés |
| 31. | LADÁNYI Gábor Dr. | Diagnosztika a karbantartásban |
| 32. | MÉSZÁROS János, MOLNÁR Tibor, RITZL András | KIÜRÍTÉSI ÉS MENEKÜLÉSI ÚTVONALBA ÉPÍTETT AJTÓK tervezési segédlet (2018) |

2019.

- | | | |
|-----|---|---|
| 33. | BLAZSOVSZKY László | Földgáz elosztóvezetékek üzemeltetése |
| 34. | DR. SZILÁGYI Zsombor | A megújuló energiahordozók jövője Magyarországon |
| 35. | FORGÁCS Lajos Dr., HAIDEGGER Tamás Dr., PÓLYA Endre ifj. | Új fejlesztések, innovatív megoldások az orvostechnológia terén |
| 36. | VARRÓ Beáta, KIS András Dr. | Magyarországon előforduló, épületekbe beépített faanyagokat károsító gombák vizsgálata és azonosítása DNS diagnosztikával |
| 37. | MANNINGER Marcell, SZEPESHÁZI Attila, SCHEURING Ferenc, MOLNÁR György | Munkatér határoló szerkezetek |
| 38. | KORSÓS András, RÁDULY Zsolt | A közterületi és belterületi térfigyelő kamerarendszerek tervezési irányelvei |
| 39. | GERGELY Edit, BEZEGH András Dr. | Módszertani útmutató az üvegházhatású gázok közvetlen és közvetett kibocsátásának számítására |

40.	BEZEGH András Dr., BITE Pálné Dr., GERGELY Edit	Városi környezetvédelem (Fenntartható és okos városok)
41.	GÓDOR Balázs, KÁSA László Dr., SZÉKELY Bence	Híddaruk méretezési segédlete (2019.)
42.	FÜRJES Andor Tamás, KOTSCHY András, NAGY Attila Balázs, CSOTT Róbert	Teremakusztikai méretezés gyakran előforduló szituációkban
43.	KARÁCSONYI Zsolt Dr.	Faanyagok tartós szilárdsága Faanyagok szilárdságának változása az idő függvényében
44.	BALIKÓ Sándor Dr., ORBÁN Tibor, VARGA Péter, ZSEBIK Albin Dr.	Ötletlapok II. – Energiahatékonyság növelő ötletek egyszerű energetikai és gazdasági számításai
45.	PRIMUSZ Péter, PhD.	Hajlékony útpályaszerkezetek méretezése talajstabilizációk figyelembevételével
46.	NÉMETH Balázs, HÁMORI Sándor, KOSTYÁK Attila, VÍGH Gellért	Különböző funkciójú épületek klímatechnikája III. Segédlet ipari épületek lég- és klímatechnikai rendszerének tervezése
47.	JANCSÓ Béla, KAVECZKI Gergely, KÓCZÁN Gábor, LABORCZI Tamás, KNOLMÁR Marcell, RAUM László	Csapadékvízgazdálkodás tervezési követelményei Hogyan tervezzünk városi csapadékelvezető rendszereket
48.	DOHÁNY Máté, SCHVANNER Norbert	Kerékpárosok sebességének felülvizsgálata jelzőlámpás csomópontokban
49.	JÓZSA Bálint, S. VÍGH Judit	Sebességcsökkentés hatásainak vizsgálata gyorsforgalmi utakon
50.	ZSEBIK Albin Dr., NOVÁK Dániel	Projektlapok I. – Energiahatékonyság növelő javaslatok projektlapjai
51.	MÓGA István Dr.	Beruházási projektek szabályozási és szabvány környezete, Tervezési követelmények meghatározása
52.	GÁBORI László Dr., BEINSCHRÓTH József Dr., NÓGRÁDI Gábor, RÁTKAY Tamás	Informatikai Tervező szakmai minősítő rendszere (Informatikai szakmai terület illesztése a Mérnök Kamarai működési rendbe és rendszerekbe) I. kötet: Konceptió és modell II. kötet: Modell illesztése III. kötet: Tudástár
53.	VIRÁG Zoltán, GYURKOVICS Zoltán, SZAKÁL Szilárd, VIRÁG Zsolt, ORCSI Attila	Országos Tűzvédelmi Szabályzat épületgépész értelmezése a szakmai gyakorlatban Segédlet a gyakorló épületgépész mérnökök számára I.
2020.		
54.	KISS Jenő Dr., CSERMELY Gábor	JAVASLAT az egyszerű bejelentésű lakóépület megvalósításának – tervezés építés – módszerére

55.	SZILÁGYI Zsombor Dr.	A hidrogén a környezetbarát energiahordozó, Hidrogén az energetikában
56.	VARGA Tamás, SZEDENIK Norbert Dr., KOVÁCS Károly Dr., KRUPPA Attila, KULCSÁR Lajos, KAPITOR György, TURI Ádám	A nem norma szerinti villámvédelem egységes műszaki követelményrendszerének kialakítása és javaslat a teljes villámvédelmi szabályrendszer jövőbeli egységesítésére
57.	KÁDI Ottó	A gyalogosközlekedés közúti keresztezései
58.	MOLNÁR Szabolcs	„Hulladékból konnektorba” A települési szilárd hulladék energetikai hasznosításának lehetőségei
59.	VÁRDAI Attila	Segédlet szabadidős létesítmények tartószerkezeti tervezéséhez
60.	BEJÓ László Dr.	Szénlábnyom-elemzés készítése a faiparban
61.	JANCSÓ Béla, NÉMETH Gábor, SZIMANDEL Dezső	Szakmai útmutató vízilétesítmény tervezők számára a 2020 január 1-én hatályba lépett „VIZEK keretrendszer” használatához
62.	FELLEGI Zsóka, KARAFI Balázs, KOCH Edina, KOVÁCS Gábor, MURINKÓ Gergő, TÓTH Gergely József	Munkagödrök és földművek víztelenítése
63.	HOLÉCZY Ernő, OLÁH Róbert, SIKI Zoltán Dr., TAKÁCS Bence Dr., TÓTH Zoltán Dr., VARGA Tibor	Módszertani útmutató az elavult ingatlan-nyilvántartási térképek korszerű technológiákkal végzett felújításához
64.	GÁBORI László Dr., MOLNÁR Bálint Dr., NÓGRÁDI Gábor, RÁTKAY Tamás	Az Informatikai Tervező tervezési segédlete
65.	NÁDASDY Tamás, TOMASCHEK Tamás, PALÁSTY István, SZECSŐ Dániel Géza	Dinamikus forgalomirányítás tervezői segédlete gyorsforgalmi úthálózat esetén
66.	LENGYEL István	Szakmai útmutató szolgalmi jogok alapításához (mérnöki segédlet)
67.	NÉMETH Balázs, SZLOVÁK Krisztián, VÍGH Gellért	Épületgépészeti tervezéshez praktikus, gyakorlati adatbázis
68.	FÜRJES Andor Tamás, BORSINÉ Arató Éva, NAGY Attila Balázs, ILLYÉS László, BORSI Gergely	Teremakusztikai méretezés gyakran előforduló szituációkban (példatár)
69.	BORBÁS Lajos Dr., GONDA Zoltán	Optikai feszültségvizsgálat – Kísérleti eljárás a konstrukció fejlesztésére, szerkezetek anyagfelhasználásának és teherviselésének optimalizálására

2021.

70.	BLAZSOVSZKY László	A gázipar és a kéményseprő-ipar határterületeinek szabályozási anomáliái a szakmagyakorlók és a felhasználók szemszögéből
71.	FORGÁCS Lajos Dr., NAGY Gábor, RÉV Zoltán	Kórháztervezés új szempontjai a 21. században - Korszerű kórházak infrastrukturális egységei
72.	HOLÉCZY Ernő, KISS Albert Miklós, KOVÁCS István, TAKÁCS Bence Géza Dr., TÓTH Zoltán Dr.	M.2.-2021. Mérnökgeodéziai tervezési segédlet
73.	BEJÓ László Dr.	Az ipar 4.0 alkalmazási lehetőségei a faipar területén

- | | | |
|-----|---|--|
| 74. | BORBÉLY Dániel, HUDACSEK Péter, KARNER Balázs, KOVÁCS László, SÁNDOR Csaba | Monitoring, a geotechnikai kockázatkezelés eszköze |
| 75. | FELFÖLDI Krisztina, JÁMBOR András, TÓTH Sándor, BŰKI Gábor, GÓDOR Balázs | Emelőgépek időszakos vizsgálatának eljárásrendje |
| 76. | GYURKOVICS Zoltán, RÉBAY Lajos, NAGY Bernát | Szakmai útmutató az épületgépész felelős műszaki vezetők és műszaki ellenőrök számára |
| 77. | ZSEBIK Albin Dr., NOVÁK Dániel, PAPP Ábrahám | Hulladék hő hasznosítás - hűtés és fűtés összekapcsolása
Segédlet az elemzéshez és gyakorlati példák bemutatása |
| 78. | CZINE Ferenc, HIRKÓ György | Elektromos meghajtású mikromobilitási eszközök -
Jellemző paraméterek |
| 79. | KALMÁR Tamás, LÁNYI Péter Dr., HÓZ Erzsébet | Kerékpárút hálózatok vizsgálata a fejlesztések és
úthasználók tapasztalatai alapján |
| 80. | VARGA Tamás, FARKAS Péter János, TOKODY Dániel Dr., ZSARNOVSZKI Attila, MÉSZÁROS Tamás, VERESS Árpád | Építményvillamossági tervezés robbanásveszélyes
környezetben |
| 81. | VONA Márton Dr., BALATONYI László Dr., TÉCSŐY István | Dombvidéki víz visszatartás, kisvízfolyások szabályozása
természet közeli megoldásokkal
Kisléptékű vízvisszatartás, kistelepülés-léptékű
vízmeztartó megoldások |
| 82. | ZANATHY Valéria, BUZÁS Györgyi, TÓTH László | Acélszerkezetek korrózió elleni védelme – Acélszerkezetek
korrózió elleni védelmére vonatkozó szabványok,
előírások, szakmai tapasztalatok összefoglalása |
| 83. | JÓZSA Bálint, DOHÁNY Máté | DDI, avagy a fordított gyémánt csomópontok vizsgálata és
magyarországi alkalmazhatósága |
| 84. | SZÉPSZÓ Gabriella, ALLAGA-ZSEBEHÁZI Gabriella, LAKATOS Mónika, SZENTES Olivér, TAKSZ Lilla, SELMECZI János Pál, CZIRA Tamás Dr., CSÓKA Gergely, BAKA György | Éghajlatvédelmi vizsgálatok módszertana és az azt
megalapozó adatbázisok alkalmazása |
| 85. | ZSIGMONDI András, MARIÁN Gábor, WÉBER László | A műszaki egyenértékűség és helyettesítő termék
egyenértékűségének megállapítási módjai |
| 86. | NAGY János, HORVÁTH Rita, KAPITOR György, MERTLI Ferenc, PAPP Ábrahám, SITKU György, ZSEBIK Albin Dr. | Világítástechnika - segédlet az EKR dokumentáció
készítéséhez – Alapismeretek és mintapéldák |
| 87. | CSENDES János, VELLER Tamás | Épületautomatika – Összefüggésben az
Energiahatékonysági Kötelezettségi Rendszerrel |

2022.

- | | | |
|-----|--|---|
| 88. | FÖLDI László József Dr., BERENCSI Bence | Ipari gépek CE jelölése és biztonsága az EU-s és hazai
szabályozás tükrében |
| 89. | SZILÁGYI Zsombor Dr., VADÁSZI Marianna Dr. | Irányelv új földgáz- és villamos energia szerződéskötéshez |
| 90. | MÓCZÁR Balázs Dr., CSORBA Gábor, GRITSCH Ákos, KRISTON Gábor, MIHUCZ Tibor, SZENDEFY János Dr., SZILÁGYI Katalin | Segédlet ipari padlók geotechnikai és statikai tervezéséhez,
kivitelezéséhez |

91.	FELFÖLDI Krisztina, GÓDOR Balázs, NAGY Pál, RADVÁNYI G. Levente	G-D-36 Tanúsítvány kiadásához kompetencia-követelmények kidolgozása
92.	BUZÁS Zoltán, KÁLMÁN Miklós, BÖLSEI Tamás, LUKÁCS Tamás	A tervdokumentációk tartalmi és formai követelményeinek átdolgozása, különös tekintettel a Hír-Közmű bevezetésére. A Tervezés, Engedélyezés, Kivitelezés segédlet módosítása (92./1-2-3.)
93.	SIKI Zoltán Dr., CSEMNICZKY László, HOLÉCZYNÉ KAJTÁR Dóra, LEHOCZKY Máté, RÉPÁS Zoltán, TÓTH István	Szakmai útmutató digitális tervezési alaptérképek készítéséhez. A minőségi mérnöki munka segítése, a jó gyakorlat bemutatása, javaslat a térképek rétegszerkezetére és az alkalmazandó jelkulcsokra
94.	CSERMELY Gábor, TÓTH Péter	Szakmai útmutató a magasépítési kivitelezési munkák minőségellenőrzésére
95.	MARIÁN Gábor, ZSIGMONDI András	Az építési beruházások műszaki átadás-átvételi eljárása – Szakmai ajánlás az építési beruházások műszaki átadás-átvételi eljárására
96.	BARNA Sándor, MOLNÁR Tibor Dr.	Segédlet az AERMOD view szoftver használatához a légszennyező anyagok terjedési modellezéséhez
97.	BAKA György	A talajnak, mint természeti erőforrásnak a védelme a beruházások megvalósítása során
98.	BLAZSOVSZKY László	A gázipari szakmagyakorlók megváltozott felelőssége, hatásköre és a mindennapok gyakorlatának anomáliái a megváltozott jogszabályi környezetben
99.	FÜRJES Andor Tamás	Elektroakusztika elméleti és gyakorlati áttekintés
100.	RÁCZ Tibor, KUN Csaba, BALATONYI László Dr.	ITVT Integrált Települési Vízgazdálkodási Terv tervezési segédlet

2023.

101.	SZILÁGYI Zsombor Dr., BLAZSOVSZKY László	Az energiahordozók jövője
102.	BLAZSOVSZKY László	Szakmai útmutató felhasználási helyek gázellátását biztosító elosztóvezeték leágazásának létesítéséhez
103.	ÁKOSHEGYI György Dr., BORBÉLY Tibor, DIÓS András, EÖRDÖGH Zsolt	Medencés fürdők vízgépészeti tereinek tervezési szempontjai
104.	KISS Jenő dr., METZING Ferenc dr., CSERMELY Gábor, dr. HEGYI Dezső, KÖNCZÖL Gyula, DEZSŐ Zsigmond	Szakmai Útmutató az épületek, épületszerkezetek bontásához
105.	MÓGA István Dr.	Atomerőművi alapok
106.	BAK Edina, FEJES Gábor, HONTI Imre, HUDACSEK Péter, SCHELL Péter	Talajmechanikai laboratóriumi vizsgálatok, azok megtervezése és eredményeinek felhasználása a geotechnikai tervezői gyakorlatban
107.	EGRI Sándor, BUZÁS Zoltán	AutoCAD alapon készített tervdokumentációkból EHO szerinti XML fájl készítése (objektumsablon készítése)
108.	BONDOR Gabriella, CSORDÁS Szilveszter, KANOSIK Ilona, PÓLYA Endre, VARJÚ József	Szakmai ismeretek a jogosultsági vizsgára
109.	KAKUK Ilona	Az Informatikai Tervező Szakmai Útmutatója (109./1-2-3.)

- | | | |
|------|---|---|
| 110. | GIORIS Nikolaos, MENYHÁRT István Zsolt, OLÁH Róbert, TAKÁCS Bence dr., VASS Imre | Digitális mellékletek készítése az M.2 (2021.) mérnökgeodéziai tervezési segédlethez |
| 111. | ZSIDAI László Dr., SARANKÓ Ádám Dr., SZABÓ Péter | Az additív technológiák terméktervezési és technológiai sajátosságai |
| 112. | REINIGER Róbert, BARNA Sándor, BITE PÁLNÉ DR. PÁLFFY Mária, MIHICS Dalma, PINTÉR István | A Li-ion alapú akkumulátor, illetve akkumulátor részegység gyártás környezetvédelmi hatásági engedélyezésének környezetvédelmi alapkövetelményei - Szakmai segédlet környezetvédelmi szakértők, illetve hatásági eljárási szereplők részére |
| 113. | TOKODY Dániel Dr., SCHOTTNER Károly, HADDAD Richárd, ADY László, ÁGOSTON Gergő, DRABIK Gergő, HAN Xiaoping, CSAPÓ Dániel, SZŰCS Marcell, FELHŐS Dávid Dr. | Napelemes rendszerekkel együttműködő energiatárolók létesítése |
| 114. | GYIMESI András Dr., BOHÁCS Gábor Dr., SÜLLE Miklós, GÓDOR Balázs | Építőgépezés mesteriskola tantárgyi felépítés és a hozzá kapcsolódó tematika kidolgozása |
| 115. | BOROS János | Az atomerőművi rendszerek és rendszerelemek tervezésénél figyelembe vett elvek összefoglalása |
| 116. | PRIMUSZ Péter Dr. | Hajlékony útpályaszerkezetek szükséges erősítőrétegének meghatározása roncsolásmentes teherbírásmérés alapján |