

**Ipari, mezőgazdasági, kereskedelmi utak és tárolóterek
betonburkolatainak tervezése**

MMK-MBBE továbbképző tanfolyam.

Az előadás a Magyar Betonburkolat Egyesület (MBBE) kiadásában
2012-ben megjelent Betonburkolatok című szakkönyvön alapul.

Előadó: Dr Keleti Imre



2013. március

Tartalomjegyzék

A VIZSGÁLT TÉMÁK 3	
1. A KÜLÖNBÖZŐ ÚTPÁLYASZERKEZETEK ÉS A FELHASZNÁLÓI IGÉNYEK	3
2. A PÁLYASZERKEZET-TÍPUS KIVÁLASZTÁSÁNAK IRÁNYELVEI	3
2.1. A megrendelő tervezési diszpozíciója	4
2.2. Pályaszerkezet javaslatok	6
2.3. Hatékonysági vizsgálat	7
3. BETONBURKOLATOK TERVEZÉSE ÉS MÉRETEZÉSE	8
3.1. Tervezési célkitűzés	8
3.2. A hézagolt betonburkolatok méretezésének és tervezésének alapelvei	9
3.2.1. A földmű minősége, az ágyazási együttható	9
3.2.2. A fagyveszélyesség vizsgálata	11
3.2.3. A hézagolt betonburkolatban keletkező feszültségek	13
3.2.4. A forgalmi terhelés okozta húzó feszültség	14
3.2.4.1. Méretezés kerékterhelésre	14
3.3. Hézag nélküli betonburkolat	15
3.3.1. A folytonos vasalású betonburkolat	15
3.3.2. Kompozitburkolat	16
4. A VIZSGÁLT ALKALMAZÁSOKHOZ VÁLASZTHATÓ BETONBURKOLATOK ÉPÍTÉSI MÓDJAI	16
4.1. Hengereltbeton burkolat	18
5. SZÁMPÉLDÁK KERÉKTERHELÉSRE VALÓ MÉRETEZÉSHEZ	21
5.1. Intermodális logisztikai központ konténertároló térburkolata	21
5.1.1. A mértékadó forgalom és a kerékterhelés	22
5.1.2. A földmű felső rétege, fagyvédelem	23
5.1.3. Az ágyazási együttható számítása	24
5.1.4. A hézagolt betonburkolatban keletkező feszültségek	24
5.1.4.1. Hőmérsékletváltozás miatti feszültségek	24
5.1.4.2. Vetemedési feszültség	24
5.1.4.3. A szélén terhelt betontáblában ébredő húzó feszültség	25
5.1.4.4. Az összes feszültség	25
5.1.4.5. A megengedhető feszültség	25
5.1.4.6. A pályaburkolati beton vastagságának megfeleltetése	25
5.2. Hulladékudvar térburkolata	26
5.2.1. A törmelék feldolgozás okozta forgalom	27
5.2.2. A feldolgozott törmelék kiszállítása okozta forgalom	28
5.2.2.1. Készáru-rakodás	28
5.2.2.2. A készáru kiszállítás	28
5.2.3. Összesített forgalom	29
5.2.4. A földmű felső rétege, fagyvédelem	29
5.2.5. Az ágyazási együttható számítása	29
5.2.6. A hézagolt betonburkolatban keletkező feszültségek	29
5.2.6.1. Hőmérsékletváltozás miatti feszültségek	29
5.2.6.2. Vetemedési feszültség	29
5.2.6.3. A szélén terhelt betontáblában ébredő feszültség	30
5.2.6.4. Az összes húzófeszültség	30
5.2.6.5. A megengedhető húzófeszültség	30
5.2.6.6. A pályaburkolati beton vastagságának megfeleltetése	30
5.2.6.7. A növelt vastagságú hengereltbeton burkolat megfeleltetése	30
ÁBRÁK JEGYZÉKE	31
TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE	31

A vizsgált témák

1. A különböző útpályaszerkezetek és a felhasználói igények.
2. A pályaszerkezet-típus kiválasztásának irányelvei.
3. Betonburkolatok tervezése és méretezése.
4. A vizsgált alkalmazásokhoz választható betonburkolatok építési módjai.
5. Számpéldák kerékterhelésre való méretezéshez.

1. A különböző útpályaszerkezetek és a felhasználói igények

A közúti, ipari, kereskedelmi, mezőgazdasági, légiközlekedési, létesítmények használói az üzemi követelményeik kielégítésének elsődleges igénye miatt csak olyan pályaszerkezeti megoldásokat fogadnak el, amelyekről elvárható, hogy kezdeti szolgáltatási színvonaluk a pályaszerkezet tervezési élettartama alatt a fellépő igénybevételeknek ellenállva megmaradjon, amennyiben azokat az igénybevételekhez igazított tervezési, építési eljárásokkal hozták létre, üzemeltették és tartották fenn.

A tervezési időszak alatt reálisan elvárható szolgáltatási szint: állékony szerkezet, a tervezési forgalomnak ellenálló teherbírás, a tervezett forgalom akadálymentes lebonyolíthatósága, nem kátyúsodó, jól víztelenedő egyenletes felület.

A tervezési élettartam alatt fellépő mértékadó igénybevételek

- az időjárási viszonyokból,
- a tervezett mozgó és álló forgalomból,

keletkező hatásokból állnak.

Az igénybevételeknek a felsorolt alkalmazási területeken többféle burkolatú pályaszerkezet is megfelelhet, attól függően, hogy az alkalmazók rövidebb vagy hosszabb ideig gondolják a megkívánt szolgáltatási szintet a legkisebb ráfordítás mellett a tervezési élettartam alatt fenntartani. Amennyiben ez az időszak meghaladja a 20 évet, akkor a különböző kialakítású betonburkolatú merev pályaszerkezetek azok, amelyek az ilyen igénynek akár 50 év szolgálati ideig is maradéktalanul megfelelnek. A betonburkolatok alkalmazási területeit az *1. táblázat* foglalja össze.

A továbbiakban a magánutak, valamint az intermodális konténer terminálok, kamionparkolók, hulladék udvarok merev¹ pályaszerkezeteinek tervezésével és megvalósításával foglalkozunk.

2. A pályaszerkezet-típus kiválasztásának irányelvei

A pályaszerkezet-típus kiválasztásának irányelveit a Betonburkolatok című könyv (továbbiakban: Könyv) 3. fejezete tárgyalja. Itt most e műveletnek a magánutak, valamint közlekedési és ipari térburkolatok kiválasztására vonatkozó sajátosságait foglaljuk össze. Az ilyen létesítmények használóinak fontos gazdasági érdeke fűződik ahhoz, hogy a tulajdonukban vagy kezelésükben lévő szállítóút, intermodális logisztikai központ, hulladékudvar üzeme a pályaszerkezet oldaláról nézve megbízható legyen, azaz a pályaszerkezetnek ne következzenek be kiszámíthatatlan időpontokban olyan hibái, amelyek kijavítása akadályozná az adott üzemi folyamatos és így hatékony működését. E követelménynek megfelelő pályaszerkezet kiválasztásához a tervezési időszak alatti forgalmi és éghajlati terhelés alakulását, a létesítmény

¹ Emlékeztetőül: az útpályaszerkezetek szilárdságtanilag hajlékony és merev szerkezetekre oszthatók. Hajlékony pályaszerkezetnek tekinthetők az aszfaltburkolatú, illetve a kiskő (térkő) burkolatú kötőanyag nélküli alaprétegen fekvő pályaszerkezetek. A merev pályaszerkezetek burkolata beton, vagy teherviselő betonlemezről és aszfalt kopórétegből álló kompozit szerkezet, alaprétegük kötőanyaggal, vagy a nélkül készül. A két fő csoport között átmenetet képeznek a hidraulikusan kötött burkolatalapú, aszfaltburkolatú „félmerev” pályaszerkezetek. A hajlékony pályaszerkezetek a földműre nagyobb fajlagos nyomást adnak át, mint a terhelést jobban elosztó merev pályaszerkezetek.

burkolatai iránt támasztott szolgáltatási színvonaligényt, valamint a létesítmény által érintett terület hidrológiai, geológiai és topográfiai viszonyait ismerni kell.

2.1. A megrendelő tervezési diszpozíciója

A létesítmény lehetséges pályaszerkezeteinek vizsgálata során a megrendelő tervezési diszpozíciójából kell kiindulni, amelynek tartalmaznia kell

- a tervezési feladat jellegét (új létesítmény építése, meglévő létesítmény felújítása),
- a tervezési forgalom meghatározásához rendelkezésre álló információkat,
- a pályaszerkezet elvárt élettartamát, és ezen idő alatt nyújtandó szolgáltatási színvonal követelményeit,
- a téli üzemeltetés tervezett módszereit,
- a fenntartás és üzemeltetés műveleteit végző szervezet árszínvonalát.

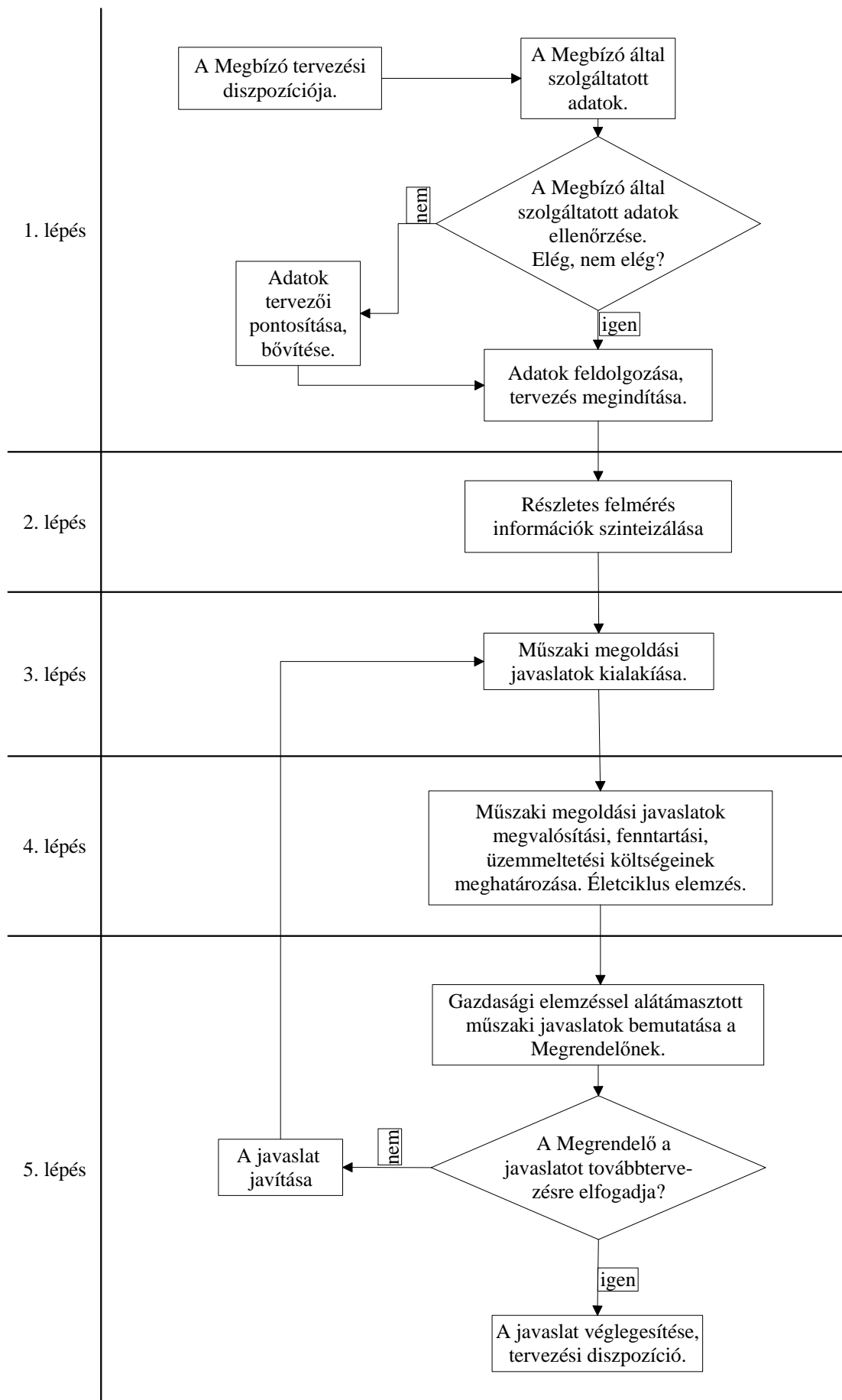
Az ilyen eljárás szerinti célszerű tervezési lépésekre mutat be példát az *1. ábra*.

1. táblázat. A betonburkolatok alkalmazási területei

Alkalmazási terület							
Közút	Hálózat	Országos			Helyi		
	Hálózati elem	gyorsforgal- mi út	egyéb főút	mellékút	főforgalmi út	gyűjtőút	lakóút
	Ajánlott tervezési élettartam [év]	40	30		40	30	
	Forgalmi terhelési osztály ²	E-R	C-E	A-C	E-R	C-E	A-C
Magánút	Út fajtája	Ipari szállítóút			Mezőgazdasági út		
	Ajánlott tervezési élettartam [év]	A megrendelő igénye szerint					
	Forgalmi terhelés	Egyedi számítás szerint					
Térburkolat	Funkció	Intermodális logisztikai központ			Hulladékudvar		
	Ajánlott tervezési élettartam [év]	A megrendelő igénye szerint					
	Forgalmi terhelés	Egyedi számítás szerint					
Bármely repü lőtér burkolt felülete	Funkció	Felszállópálya és gurulóút			Forgalmi, illetve műszaki előtér		
	Ajánlott tervezési élettartam [év]	Az ICAO előírásai szerint 20. Ettől a megrendelő felfelé eltérhet.					
	Forgalmi terhelés	A forgalmi prognózis szerinti mértékadó repülőgépre számítva					

² Emlékeztetőül a közúti forgalmi terhelési osztályok:

Forgalmi terhelési osztály		100 kN-os egységtengelyek áthaladási száma [millió db]
jele	neve	
A	Nagyon könnyű	< 0,1
B	Könnyű	0,1–0,3
C	Közepes	0,3–1,0
D	Nehéz	1,0–3,0
E	Nagyon nehéz	3,0–10,0
K	Különösen nehéz	10,0–30,0
R	Rendkívül nehéz	>30,0



1. ábra A pályaszerkezet kiválasztásának folyamata

2.2. Pályaszerkezet javaslatok

A Tervező különböző betonburkolatú pályaszerkezeteket javasolhat vizsgálatra. E javaslatok közül mutat be példaként néhányat a 2. táblázat.

2. táblázat Javaslat alkalmazható betonburkolat típusokra

Alkalmazás	Tervezési élettartam [év]	Javasolható burkolattípus	Mértékadó	
			jármű vagy munkagép	forgalmi igénybevétel iránya
Ipari, bányászati szállítóút	50	Hézagolt betonburkolat teherátadó vasalással, vagy folyamatosan vasalt betonburkolat	Merev alvázú nehéz dömpér	Úttengely irányú
Intermodális logisztikai központ szállítóútja			Közüti nehéz tehergépkocsi	Úttengely irányú
Intermodális logisztikai központ konténertároló tere		Hézagolt betonburkolat egymásra merőleges irányokban teherátadó vasalással	Konténerrakodó gép	Mindenirányú
Hulladékudvar tárolótere	20-30	Hengereltbeton burkolat	Gumikerekes homlokrakodó	Mindenirányú
Kamionparkoló	40	Hézagolt betonburkolat forgalmi irányokban teherátadó vasalással	Közüti nehéz tehergépkocsi	Úttengely irányú kijelölt útvonalon
Mezőgazdasági út		Hézagolt betonburkolat, vagy folyamatosan vasalt betonburkolat		Úttengely irányú

A pályaszerkezet és burkolata kiválasztásához még célszerű számba venni az éghajlat változás hatásait is (3. táblázat).

3. táblázat Az éghajlatváltozás burkolatokra gyakorolt hatása és a lehetséges válaszok

Éghajlatváltozás elemei	Hatás	Válasz
Globális felmelegedés	Nyáron felmelegedett burkolat deformációja	Helyesen tervezett és épített betonburkolat
Túl sok csapadék	Belvíz	Hatékony vízelvezetési rendszer Teherbíró töltéstartó
Túl kevés csapadék	Földmű/rézsű összerepedezése	Burkolt rézsű, vagy speciális füvesítésű rézsű A vízelvezető rendszer gondos karbantartása
Szélsőséges téli időjárás	Jeges, csúszós burkolatfelület	Előzetes olvasztósózás Kopóréteg elektromos melegítése
		Nagy teljesítményű hóeltakarító járművek Hófogó erdősávok telepítése
	Nagy mennyiségű hó a burkolaton (a forgalom lassabbá válása vagy akár megbénulása)	Hóvédművek a hőtörzsek ellen
		Hóvédművek a hőtörzsek ellen
Gyakori fagyási-felengedési ciklusok	Földmű elnedvedezése	Szemcsés talajból készülő, tömör földmű
	Pályaszerkezet összerepedezése, kátyusodása	Fagyvédő réteggel ellátott vastag pályaszerkezet Nagy húzószilárdságú pályaszerkezeti anyagok

2.3. Hatékonysági vizsgálat

A pályaszerkezet kiválasztására irányuló döntési folyamatban a legfontosabb az a hatékonysági vizsgálat, amely a létesítmény i -edik lehetséges pályaszerkezetének a tervezési élettartam, vagy azon belül a vizsgálati időszak³ alatt folyó áron számított összes költségét (K_i) méri fel, amely a szóban forgó burkolatú pályaszerkezet folyó áron számított

- beruházási (B_i),
- környezetterhelési ($Kö_i$),
- üzemeltetési ($Üz_i$),
- fenntartási (Fe_i),
- társadalmi ($Tá_i$),
- rehabilitációs (Re_i) költségeinek,
- valamint a maradványértékének ($Mé_i$) összege.

$$K_i = \sum_{t=0}^n (B_i, Kö_i, Üz_i, Fe_i, Re_i, Tá_i, Mé_i) \quad (\text{Könyv 3/1 képlet})$$

Gazdasági szempontból az a megoldás javasolható, amelynél a K_i nettó jelenértéke (K_{iNPV}) a vizsgált változatok közül a legkisebb. A nettó jelenértéket (NPV) a

$$K_{iNPV} = \sum_{t=0}^n K_t / (1+d)^t \quad (\text{Könyv 3/2 képlet})$$

képlettel számoljuk, ahol

- K_t : az adott évre vonatkozó folyó áron számított összes ráfordítás,
- d : a diszkonttényező,
- t : a vizsgálati időszak aktuális éve,
- n : a tervezési élettartam vagy vizsgálati időszak utolsó éve.

A diszkonttényezőt – amennyiben a megrendelő másképpen nem rendelkezik – az érvényben lévő szabályozás szerint kell számításba venni⁴.

A számszerűsíthető hatásokon nyugvó hatékonysági vizsgálatok eredményét befolyásolhatják a nehezen vagy egyáltalán nem számszerűsíthető műszaki megfontolások, amelyek a pályaszerkezetet igénybe vevő járműforgalom sajátágaiból következnek. Ilyenek lehetnek:

- a pályaszerkezetet igénybe vevő forgalom különleges jellege (pl. a csatornázott mozgásra kényszerített közúti nehézforgalom jelentős részaránya),
- álló forgalom nehéz gépek parkolóhelyén;
- rakott konténerek tárolása,
- a létesítmény burkolt területeit használó munkagépeknek a közúti forgalomban megengedettnél nagyobb tengelyterhelése⁵.

A vizsgált változatok nem számszerűsíthető műszaki szempontjait SWOT⁶ elemzés alkalmazásával célszerű értékelni. Az előnyös változat az, amely a vizsgálat szempontjai szerint a legkevesebb gyengeséget és kockázatot mutatja fel.

³ Vizsgálati időszaknak a lehetséges pályaszerkezet változatok közül azok leghosszabb tervezési élettartamát szokás felvenni

⁴ A 2013-ban érvényes szabályozás: Módszertani útmutató költséghaszon elemzéshez. Közútfejlesztési projektek. Vasútfejlesztési projektek. Városi közösségi közlekedési projektek. Nemzeti Fejlesztési Ügynökség, 2009.

⁵ Emlékeztetőül: a megengedett közúti tengelyterhelés az EU 96/53/ EK számú irányelve szerint: egyestengely = 115 kN, kettőstengely = 180 kN.

A tervező a vizsgált létesítmény pályaszerkezetére és annak burkolatára vonatkozó javaslatát a hatékonysági elemzésekből kiadódott rangsor és a SWOT elemzéssel értékelt nem számszerűsíthető hatások alapján alakítja ki. A szolgáltatási színvonal követelményeiből kiindulva a burkolatra tett javaslat lehet hézagolt (1), illetve folytonosan vasalt (2) betonburkolat, folytonosan vasalt teherviselő betonlemezről és aszfalt kopórétegből álló kompozit burkolat (3).

A tervezésre szánt burkolattípus megválasztása – figyelemmel az üzemeltetés követelményeire – a Megrendelő kizárólagos joga. A Megrendelő által elfogadott döntési javaslatból kiindulva kerülhet sor a kiválasztott pályaszerkezet megtervezésére.

A tervezés és a méretezés során

- mindhárom esetben figyelembe kell venni a pályaszerkezet állékonyságának követelményét, amin azt értjük, hogy az a tervezési élettartam során az alatta lévő földművel együtt nem vesztheti el teherbíró-képességét.
- az (1) esetben számításba kell venni a hézagoknál a terhelésátadás képességét, míg a (2) és (3) esetben ezzel nem kell számolni, hiszen az ilyen burkolatokban a felüljáró hidak előtti terjeszkedési hézagokat kivéve nincsenek tervezetten kialakított hézagok.

3. Betonburkolatok tervezése és méretezése

A betonburkolatok tervezését és méretezését a Könyv 5. fejezete tárgyalja, kapcsolódó általános példákat a Könyv F5 függeléke mutat be.

A merev pályaszerkezetek jelen munkában vizsgált alkalmazásai általában a betonburkolatok leginkább elterjedt megoldását, az ún. hézagolt betonburkolatokat tételezik fel. Bizonyos alkalmazásoknál a folytonosan vasalt hézag nélküli betonburkolatok, a hézagolt betonburkolatok körében tartozó hengereltbeton burkolatok, illetve a kompozit⁷ burkolatok is számításba jöhetnek.

3.1. Tervezési célkitűzés

Tervezési célkitűzés: a tervezési élettartam alatt a pályaszerkezet burkolata ellen kell álljon a forgalomból, a klimatikus viszonyokból, valamint az üzemeltetésből eredő igénybevételeknek, a pályaszerkezetnek pedig mindezekkel a hatásokkal szemben állékonynak kell lennie.

A tervezés műveletei: a tervezési élettartam megállapítása, a tervezési forgalom számítása, a tervezési forgalomhoz tartozó pályaszerkezet-típus kiválasztása, a földmű teherbírási tényezőjének számítása, a pályaszerkezet méretezése.

A szerkezeti tervezés feladata az üzemi szolgáltatási igényszintnek megfelelő fajtájú betonburkolat (esetleg kompozit burkolat) és annak alaprétegből álló pályaszerkezet illesztése az azt hordozó jól víztelenített földmühöz.

A méretezés a kiválasztott betonburkolat fajtához logikusan tartozó pályaszerkezetre érvényes méretezési utasítás vagy egyedi számítás alapján történik. A kiinduló feltételek:

- A hajlító-húzó szilárdsággal rendelkező anyagoknak legyen meg a terhelés által keltett ismétlődő hajlítási fárasztással szembeni ellenálló képessége, azaz a kellő fáradási húzószilárdsága.

⁶ Emlékeztetőül: a SWOT elemzés a nem számszerűsíthető hatásokat összevető hatékonysági elemzés. A **SWOT** angol mozaikszó, ami a **S**trengths – erősségek, a **W**eaknesses – gyengeségek, az **O**pportunities – lehetőségek, a **T**hreats – veszélyek szavak kezdőbetűiből áll össze.

⁷ Kompozitburkolat: akár hézagolt, akár pedig folytonosan vasalt teherviselő betonlemezen SAMI rétegből és vékonyaszfalt kopórétegből álló burkolat, kedvező felületi jellemzőkkel.

- A húzószilárdsággal nem rendelkező anyagoknak (pl. kötőanyag nélküli alaprétegek, talaj) legyen meg az ismétlődő terhelés által keltett nyomással szembeni ellenálló képessége, azaz a kellő fáradási nyomószilárdsága.
- A burkolatba szánt anyagok legyenek képesek
 - a vízszintes erők felvételére, azaz ne deformálódjanak a járművek fékezése, gyorsítása hatására.
 - a nyomóerők felvételére, tehát tartós alakváltozást ne szenvedjenek.
- A külső környezeti hatások (hőmérséklet, nedvesség, fagy) a pályaszerkezet rétegeit ne károsítsák.

A méretezés eredménye a többrétegű merev pályaszerkezet, amelynek lehetséges felépítését a 4. táblázat szemlélteti.

4. táblázat A merev pályaszerkezetek lehetséges felépítése

Megnevezés		Betonburkolatú	Kompozitburkolatú
szerkezet	réteg	pályaszerkezet	
Pályaszerkezet	burkolat	hézagolt, vagy folytonos vasalású betonburkolat	aszfalt kopóréteg
			folyamatosan vasalt, teherviselő betonlemez
	alapréteg	1. (felső) alapréteg	
		2. (alsó) alapréteg	
Földmű	védőréteg	töltés vagy bevágás talajrétege	
	talajréteg		
Altalaj	földmű alatti talaj	töltés alatti talaj, bevágásban a védőréteg vagy javított talajréteg alatti talaj	

3.2. A hézagolt betonburkolatok méretezésének és tervezésének alapelvei

A hézagolt betonburkolatok méretezését Westergaard alapvetései, majd az általa, illetve Teller, Sutherland, Kelley valamint Eisenmann által továbbfejlesztett összefüggések alapján a Könyv 5.2. fejezete tárgyalja.

3.2.1. A földmű minősége, az ágyazási együttható

A földmű minősége, teherviselő képességének tartóssága a merev pályaszerkezetek állékonyságát döntően befolyásoló tényező. A forgalmi terhelést végső fokon a burkolat és az alapréteg közbejöttével a földmű viseli, tehát pályaszerkezet állékonysága végül is a földmű teherbírásától függ.

A földmű teherbírásnak a méretezéseknél leggyakrabban felhasznált mérőszámai⁸:

- a CBR szám,
- az E teherbírési modulus,
- a k ágyazási együttható.

A betonburkolat Westergaard-féle méretezése a k ágyazási együtthatóval jellemzi a merev pályaszerkezet burkolata alátámasztásának teherbírását. A Winkler-féle feltevés szerint az alátámasztásban keletkező nyomás (q) arányos a lemez behajlásával (y) azaz:

$$q = k \cdot y \quad (\text{Könyv 5/1 képlet})$$

ahol k az arányossági tényező, ismertebb elnevezése: **ágyazási együttható**.

A földmű teherbírását köztudottan az ASTM D 1194 szabvány⁹ szerinti tárcsás méréssel lehet megállapítani. Ennek során a 30 hüvelyk (in), azaz 762 mm átmérőjű merev tárcsát addig kell

⁸ Ezek a mérőszámok egymásból jó közelítéssel átszámolhatók. A méretezés vagy előíranyoz egy minimálisan elérendő földmű-teherbírési értéket, vagy pedig tudomásul veszi a természet adta tényleges értéket és erre tervez.

terhelni, míg annak süllyedése 0,5 hüvelyk, azaz 1,27 mm nem lesz. Ekkor a Könyv (5/1) összefüggésből számolható a **k** ágyazási együttható.

Bár a nagytérőjű tárcsát használó helyszíni tárcsás mérés realisabb eredményt ad, a nagytérőjű tárcsa használatának nehézsége miatt a 30 cm átmérőjű tárcsa használata terjedt el¹⁰.

A tárcsás méréssel az **E** modulus meghatározása megbízhatóbb, mint az ágyazási együtthatóé, ezért elterjedt a **k** együtthatónak az **E** modulus alapján való számítása. Hazai méréseink¹¹ a kötőanyag nélküli alapoknál a **k** ágyazási együttható közelítő értékére a következő összefüggést eredményezték:

$$k \approx 0,0022 \times E_2 / T_t \text{ [N/mm}^3\text{]}, \quad (\text{Könyv 5/4 képlet})$$

ahol T_t : a tömörségi tényező (MSZ 2509/3)¹²; E_2 : a talaj teherbírasi modulusa.

A **CBR** és a **k** ágyazási együttható között az AASHTO¹³ mérései szerint fennálló összefüggés:

$$k \approx 0,015 \times \text{CBR}^{0,57} \text{ [N/mm}^3\text{]} \quad (\text{Könyv 5/5 képlet})$$

Az E_2 és a CBR közötti összefüggést figyelembe véve:

$$E_2 \approx 10 \times \text{CBR}^{2/3} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (\text{Könyv 5/6 képlet})$$

$$k \approx 0,0021 \times E_2^{0,86} \text{ [N/mm}^3\text{]} \quad (\text{Könyv 5/7 képlet})$$

Abban az esetben, ha a betonburkolat nem talajra vagy szemcsés alaprétgre kerül, akkor az **E** modulus az alaprét és az altalaj modulusaiból lehet ($E_{\text{talaj}} = 50 \text{ N/mm}^2$ feltételezésével) a következő közelítő összefüggésből kiszámolni:

$$E_{\text{felsz}} \approx (0,014 \times h + 12,0) \times E^{0,34}, \quad (\text{Könyv 5/8 képlet})$$

Ahol h : a réteg vastagsága [mm]; E : a rétegmodulus¹⁴ [N/mm²].

Az ágyazási együttható nagysága csak kismértékben befolyásolja a betonburkolatban az igénybevételek hatására ébredő hajlítófeszültséget (lásd a Könyv 5.5. ábrát). A közutakra vonatkozó hazai előírásunk szerinti követelményekből kiindulva a vizsgált pályaszerkezetek földműveire az 5. táblázatban összefoglalt tömörségi és teherbírasi értékek írhatók elő.

Ha az előírt teherbírást bármi okból a hordozó földmű természet adta tulajdonságai következtében nem lehet elérni és tartósan megtartani, akkor talajcserével vagy talajstabilizálással kell a földművet javítani. Az 6. táblázat a javítórétg anyagára és szükséges vastagságára ad példákat.

⁹ ASTM D 1196: Standard Test Method for Non Repetitive Static Plate Load Test of Soils and Flexible Pavement Components for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements. American Society for Testing and Materials. West Conshocken, Pennsylvania

¹⁰ Ennek hatásmélysége ($z \approx 1,5 \times d$) azonban kisebb. Ebben az esetben azonban **k**-ra nagyobb értéket kapunk, ezért a számított értéket redukálni kell. Stratton¹⁰ mérései szerint a tárcsával mért ágyazási együttható elfogadható értéke közelítően:

$$k \approx k_d \approx 0,033 \times d^{0,8} \quad (\text{Könyv 5/3 képlet})$$

ahol k_d : a d (cm) átmérőjű tárcsával megkapott ágyazási együttható; d : a tárcsa átmérője [cm].

¹¹ Boromisza, T.: Beton útburkolatok alapjának minőségéről. Mélyépítéstudományi Szemle, 1974/2.

¹² MSZ 2509-3 Útpályaszerkezetek teherbíró-képességének vizsgálata. Tárcsás vizsgálat.

¹³ AASHTO = American Association of State Highway and Transportation Officials

¹⁴ Javasolható alaprétg rétegmodulusok: C12/15 beton: 10000 N/mm²; AC: 6000 N/mm²; CKt-4: 2-3000 N/mm²; FZKA-35: 500 N/mm².

5. táblázat Ipari, mezőgazdasági szállítóutak és térburkolatok földműveire vonatkozó tömörségi és teherbírási követelmények a közutakra vonatkozó hazai előírások alapján

Mélység a pályaszint alatt	Tömörség ⁽¹⁾ , T _{rp} [%]		Tervezési teherbírás ⁽²⁾ , min. E ₂ [MPa]		
	alkalmazás				
	mezőgazdasági utak, hulladékudvarok tárolóterei	ipari szállító-utak, intermodális logisztikai központok szállító útjai és konténer tárolói, kamionparkolók	logisztikai központok konténertárolói, kamionparkolók, mezőgazdasági utak, hulladékudvarok tárolóterei	logisztikai központok szállító útjai	ipari szállítóutak
Tükörszint	≥ 92	≥ 95	≥ 50	≥ 70	≥ 80
Tükörszint –0,50 m			≥ 30	–	
Tükörszint –1,00 m		≥ 88			

Megjegyzés: (1) A minősítéshez a viszonyítási térfogatsűrűséget a módosított Proctor vizsgálattal kell meghatározni (MSZ EN 13286-2 szabvány). (2) A teherbírás vizsgálatát az MSZ 2509-3 szerint kell elvégezni.

6. táblázat. Javítóréteg változatok

A javítóréteg anyaga	A talaj eredeti teherbírási modulusa E_{2talaj} [MN/m ²]	A javítóréteg szükséges vastagsága [m] az $E_{2földmü} = 50$ MN/m ² teherbírási modulus eléréséhez
Homokos kavics M22, M56 FZKA CK _h	10	0,60
		0,35
		0,25
		0,20
Homokos kavics M22, M56 FZKA CK _h	20	0,30
		0,20
		0,16
		0,15
Homokos kavics M22, M56 FZKA CK _h	30	0,20
		0,20
		0,15
		0,15

3.2.2. A fagyveszélyesség vizsgálata

Ha a földmű felső 1,0 m vastag rétegében fagyveszélyes vagy fagyérzékeny talaj van, akkor a földmű fagyvédelmét fagyvédő réteggel kell biztosítani. A vonatkozó műszaki előírás¹⁵ a közutakra érvényesen ismerteti a talajok fagyveszélyesség szempontjából történő minősítését és az útpályaszerkezetek fagyvédelmének tervezését. Ezt az előírást a vizsgálatunkba vont pályaszerkezetek esetében is használhatjuk. A talajok minősítését fagyveszélyesség szempontjából az 7. táblázat foglalja össze.

¹⁵ ÚT2-1.201:2008 Közutak tervezése (KTSZ). Magyar Útügyi Társaság

7. táblázat. Talajok minősítése fagyveszélyesség szempontjából

Minősítés		Talaj megnevezése	Szemeloszlás jellemzése		Plaszticitási index, I_p [%]	
			0,02 mm-nél	0,1 mm-nél		
			kisebb szemek m%-a			
X-1	Fagyálló	Homokos kavics	< 10	< 25		
		Kavicsos homok				
		Homok				
X-2	Fagyérzékeny	Iszapos kavics	10-20	25-40		
		Iszapos homok	10-15			
		Sovány agyag				15–20
		Közepes agyag				20–30
		Kövér agyag				>30
X-3	Fagyveszélyes	Iszapos kavics	> 20	> 40		
		Iszapos homok	> 15			
		Finomhomok	< 10	> 50	5–15	
		Iszapos finomhomok	> 10			
		Iszap				10–15

A talajokba behatoló „F_a” fagymélységi irányértékét az éghajlati övezetektől, a forgalmi terheléstől és a talaj fagyveszélyességétől függően a vizsgálatunkba vont létesítmények esetében az 8. táblázat adja meg.

8. táblázat Az „F_a” fagymélység irányértéke

Éghajlati övezet	Burkolt út, terület					
	mezőgazdasági utak, hulladékudvarok tárolóterei		ipari szállítóutak, logisztikai központok szállító útjai és konténertárolói, kamionparkolók			
	Fagyér-zékeny	Fagyve-szélyes	Fagyér-zékeny	Fagyve-szélyes	Fagyér-zékeny	Fagyve-szélyes
	talaj fagymélységi (F _a) irányértéke [mm]					
	I.	400	500	600	700	
	II.	450	550	650	750	
	III.	500	600	700	800	

Megjegyzés: A magyarországi övezetek: I. a Dunántúl 300 m B. alatti területei. II. a Duna-Tisza-közének az M3-as autópályától délre és a Tiszántúlnak a Sebes-Köröstől délre terjedő területe, valamint a Dunántúl 300 m B. feletti területei. III. az Északi-középhegység és Tiszántúlnak a Sebes-Köröstől északra fekvő területe.

Az „F_a” fagymélységi irányérték 50 mm-rel növelendő, ha a következő körülmények közül legalább kettő fennáll:

- 2,0 méternél alacsonyabb töltésben vagy bevágásban van a vizsgált létesítmény,
- a létesítmény az éghajlati övezeten belül közismerten hidegebb területen van,
- a mikroklíma-adottságok (pl. árnyék, széljárás, élővíz közelsége) kedvezőtlenek,
- a pályaszerkezetet a talajvíz szintje télen 2,0 méternél jobban megközelíti.

Az „F_a” fagymélységi irányérték 50 mm-rel csökkenthető, ha a következő körülmények többsége fennáll:

- 8 méternél magasabb töltésben vagy bevágásban van a létesítmény,
- az övezeten belül a létesítmény közismerten melegebb területen fekszik,
- a mikroklíma-adottságok kedvezőek (település belterülete, napsütés, széljárás).

Ha a pályaszerkezet rétegeinek vastagsága nem nyújt a fagyérzékeny vagy fagyveszélyes talajnak elegendő védelmet, akkor a tervezni és beépíteni szükséges fagyvédő réteg vastagságát – 50 mm-es kerekítéssel – a következő képletből kell számítani:

$$h_v = F_a - \sum_{i=1}^n (h_i \times f_i) \quad (\text{Könyv 5/9 képlet})$$

ahol:

- h_v : a fagy elleni védőréteg szükséges vastagsága;
- F_a : a fagy talajba hatolásának mélységi irányértéke az 7. táblázat szerint;
- h_i : a pályaszerkezet i-edik rétegének vastagsága;
- f_i : az i-edik réteg fagybehatolással szembeni védőképességi tényezője a 9. táblázatból.

A védőréteg számított h_v értékének és az előforduló talajoknak, valamint a védőréteggént alkalmas anyagoknak az ismeretében a fagyvédelmet a következők figyelembe vételével kell megtervezni:

- a) Ha közvetlenül a pályaszerkezet alatt fagyveszélyes vagy fagyérzékeny talaj van, akkor azt legalább a szükséges h_v vastagságban ki kell cserélni fagyálló talajra, aminek vastagsága legalább 200 mm legyen.
- b) Ha sokkal kevesebb talajt kellene cserélni (pl. <100 mm-t), akkor célszerűbb lehet a pályaszerkezet változtatása úgy, hogy $h_v = 0$ legyen.
- c) Ha a pályaszerkezet alatt a fagybehatolási mélységen belül szemcsés anyag van, akkor az legyen fagyálló.
- d) Ha a földmű felső része nem fagyálló anyagú, akkor annak felső részét legalább 200 mm-es vastagságban külön fagyálló anyagból kell építeni.
- e) Ha a hidraulikus alapréteg alatt fagyálló anyagú réteg építésére is szükség lenne, akkor ezt a hidraulikus kötőanyagú réteg vastagításával lehet elkerülni, de fagyálló szemcsés anyag is tervezhető és építhető, és az legalább 200 mm vastag legyen.

9. táblázat Pályaszerkezeti rétegek fagybehatolással szembeni védőképességi tényezője

Pályaszerkezeti réteg	Fagyvédő-képességi tényező
Zúzottkő, mechanikai stabilizáció	1,0
Cementtel stabilizált talaj	1,1
Aszfaltmakadám, cementtel stabilizált homokos kavics	1,2
Beton burkolatalap C12/15 nyomószilárdsági osztályig	1,3
Betonburkolat C 12/15 nyomószilárdsági osztály felett	1,4
Hengereltaszfalt, öntöttaszfalt	1,5

3.2.3. A hézagolt betonburkolatban keletkező feszültségek

A betonburkolat állékonyságának feltétele az, hogy a különböző hatásokból keletkező feszültségek a tervezési élettartam alatt ne haladják meg a pályabeton (továbbiakban: beton) szilárdságát. A feszültségek nagyságára és jellegére (hajlító, nyomó, húzó) befolyást gyakorol:

- a földmű teherbírása, a pályaszerkezet alaprétegeinek szilárdsága,
- a burkolat hőmérséklete és ennek változása,
- a forgalmi terhelés.

A keletkező feszültségek ebből következően:

- zsugorodásából, hőmérséklet-változásból származó termikus feszültségek;
- a nedvesség-gradiensből keletkező feszültségek;
- a forgalmi terhelésből eredő feszültségek.

A betonburkolatban keletkező összes húzófeszültség a fenti feszültségekből tevődik össze. Amennyiben a húzófeszültség az összegzett mértéke meghaladja a beton aktuális húzószilárdságát, akkor betonburkolat kereszt-, illetve hosszirányban elreped. A repedések kialakulása szempontjából

- az elsődlegesen veszélyes időszak a betonkeverék beépítését követő korai szilárdulási szakasza, amikor a beton húzószilárdsága még nem érte el a végső szilárdsághoz közeli értékét.
- veszélyes másik időszak a már forgalomba helyezett burkolaton akkor következik be, amikor a környezeti hőmérséklet csökkenéssel együtt olyan egyenlőtlen hőmérséklet eloszlás jön létre a betonburkolatban, amelyből következő húzófeszültség a hasznos terhelésből adódó húzófeszültséggel együtt meghaladja a beton húzószilárdságát.

A repedések kialakulásának megelőzése érdekében az elsődlegesen veszélyes időszakban a keresztmetszet gyengítő bevágásokkal a betonburkolatot kereszt- és hosszirányú hézagokkal akkora méretű szabályos táblákra osztják, amelyekben a betonburkolat betonjának kötése során keletkező termikus feszültségek kisebbek, mint a beton aktuális húzószilárdsága. Így alakul ki a hézagolt betonburkolat.

E feszültségek számítását a Könyv 5.2.3. (termikus feszültségek) és 5.2.4. (forgalmi terhelésből eredő feszültségek) fejezetei tárgyalják. A hézagok tervezésével és kialakításával a Könyv 5.3. fejezete foglalkozik.

A termikus feszültségek számítására a számpéldákhoz illesztve az előadás 5. fejezetében térünk vissza.

3.2.4. A forgalmi terhelés okozta húzó feszültség

A betonburkolat állékonysága szempontjából mértékadó a forgalmi terhelésből eredő húzó feszültség. Ennek elviselésére alkalmas burkolatvastagságot a burkolat alkalmazási területe szerint kétféle módon határozhatjuk meg:

- a) Közutak esetében – kisérgalmú közutaknak (Könyv 5.7. fejezet) tekinthetjük a mezőgazdasági utakat is – számítjuk a közúti forgalmi terhelési osztályt az aktuális műszaki szabályozás¹⁶ szerint, majd kiválasztjuk a megfelelő típus pályaszerkezetet, ugyancsak a vonatkozó aktuális műszaki szabályzatból¹⁷. A forgalmi terhelés meghatározásán túl tehát nincs számítani valónk.
- b) Ipari szállítóutak, intermodális logisztikai központok konténer tárolói, kamionparkolók térburkolatai esetében kerékterhelésre méretezünk.

3.2.4.1. Méretezés kerékterhelésre

A méretezés lépései:

- 1) Felvesszük a mértékadó kerékterhelést¹⁸
- 2) Megbecsüljük a forgalmat.
- 3) Számítjuk vagy mérjük az ágyazási együtthatót (k).
- 4) Felvesszük a betonburkolat vastagságát (h).
- 5) Számítjuk a betonburkolat vetemedési feszültséget (σ_w).
- 6) Számítjuk a betonburkolat terhelés okozta húzófeszültségét (σ_r)
- 7) A két feszültség összegét (σ_{max}) megszorozzuk a terhelési ismétlődésnek (N) megfelelő fáradási csökkentő tényezővel, a σ_{max} / f_t hányadossal.

¹⁶ ÚT2-1.202:2005 Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezése és megerősítése. Magyar Útügyi Társaság

¹⁷ ÚT2-3.211:2006 Betonburkolatú és kompozitburkolatú útpályaszerkezetek méretezése. Magyar Útügyi Társaság

¹⁸ Magánutak, logisztikai központok, kamionparkolók burkolatai esetén a megrendelő által szolgáltatott adatokból a tervező állapítja meg.

8) Az így megkapott feszültséget (σ'_{\max}) viszonyítjuk a beton szilárdságához (f_t).

9) Ha $\sigma_{\max} / f_t > 1,0$, akkor megnövelt táblavastagsággal újra számolunk.

Kerékterhelésre méretezve – a fáradást figyelembe véve – a forgalmi terhelést illetően az N az elviselhető terhelésismétlődési számhoz tartozó feszültség/szilárdság arányt a Könyv (5/21) egyenletével számoljuk:

$$\sigma_{\max} / f_t = 1,037 - 0,0621 \times \lg N \quad (\text{Könyv 5/21 képlet})$$

ahol

σ_{\max} : a terhelési és a vetemedési feszültség összege [N/mm^2];

f_t : a beton szilárdsága [N/mm^2];

N: a fáradási szilárdsághoz tartozó terhelésismétlődési szám.

A forgalmi terhelés által ébresztett $\sigma_{\text{közép}}$, $\sigma_{\text{szél}}$, σ_{sarok} feszültségek a betontábla közepén, szélén és sarkán elhelyezett terhelési pozíciókban a Könyv (5/24), (5/25) és (5/26) egyenleteiből¹⁹ számíthatók. A mértékadó igénybevétel helyét a betonburkolaton mozgó terhelés mozgási karakterisztikája szerint lehet megállapítani.

A számítások hosszú volta miatt az egyenleteket a

$$\sigma = C \times P / h^2 \quad (\text{Könyv 5/28 képlet})$$

formulára egyszerűsítették, ahol

P: a kerékterhelés [N];

h: a burkolat vastagság [mm];

C a feszültségi együttható, ami a betontábla l merevségi hosszának²⁰ (Könyv 5/19 képlet) és a terhelő kör b értékének²¹ (Könyv 5/27 képlet) arányától függ. A C együttható l/b-től függő értékeiről a táblaközépen, illetve a tábla szélén ható terhelés esetén a Könyv 5.6. ábrája adja meg.

Abban az esetben, ha a kereszthézagok teherátadó vasakkal készülnek, akkor a teherátadás miatt a feszültség értékének mintegy 0,7-szeresét lehet venni.

Számpéldákat a kerékterhelésre való méretezésre az 5. fejezet mutat be.

3.3. Hézag nélküli betonburkolat

A vizsgálatba vont pályaszerkezetek egyike-másika szempontjából felvetődhetnek olyan megrendelői igények, amit a hézagolt betonburkolatokkal szemben a nem hézagolt betonburkolat alkalmazásával lehet kielégíteni. Ilyen igény lehet pl. egy intermodális logisztikai központ konténertárolóit összekötő szállítóútvonalak, amelyek üzeme olyan intenzív, hogy nem viseli el a hézagok karbantartása miatti üzemszüneteket sem.

Ebben az esetben a folyamatos vasalású betonburkolat lehet az alkalmas megoldás.

3.3.1. A folytonos vasalású betonburkolat

A folytonos vasalású betonburkolatokat a Könyv 4.2. és 5.4., valamint az F5.1.6. fejezetei tárgyalják. Méretezésükre nemzetközileg elfogadott és általánosan alkalmazott módszer még nem alakult ki. A tapasztalatok szerint az ilyen burkolatok vastagsága nem csökkenthető a

¹⁹ Magyar Betonburkolat Egyesület: Betonburkolatok. 5.2.4.1. fejezet. Budapest, 2012.

²⁰ Westergaard a betonlemez végtelen hosszúságúnak tételezte fel, és olyan merev hosszúsággal (merevségi hossz, vagy merevségi kör sugárral) helyettesítette, melynek közepén ható terhelés függőlegesében az igénybevételek és alakváltozások ugyanolyan értékűek, mint a rugalmasan felfekvő végtelen rendszerénél.

$l = \{Eh^3 / 12 (1 - \mu^2) k\}^{0,25}$, (könyv 5/19), ahol E: a pályaburkolati beton rugalmassági modulusa (célszerűen 30 000 MPa); h: a betonlemez vastagsága [mm]; k: az ágyazási együttható [N/mm^3], μ : a Poisson tényező

²¹ $b = 1,6a^2 + h^2)^{0,5} - 0,675h$, ahol a: terhelő kör sugara ($F/\pi \times p$)^{0,5}, h: a betonlemez vastagsága, F: kerékterhelés, p: abroncsnyomás

hézagolt betonburkolatokhoz képest. A terhelés hatására keletkező húzófeszültséget a Westergaard féle összefüggések közül a lemezközépre érvényes képlettel számolják (Könyv 5/24)

3.3.2. Kompozitburkolat

A kompozit burkolat teherviselő betonlemeze általában folytonos vasalású, de lehet hézagolt kialakítású is. Ez utóbbi esetben a hézagok lehetnek vasalt kiképzésűek.

A betonlemezben a terhelés hatására keletkező hajlító-húzó feszültséget a Westergaard féle összefüggések közül a lemezközépre érvényes képlettel számolják. A betonlemez méretezése során a terhelési kör sugarát az aszfalt kopóréteg vastagsági méretével meg lehet növelni. A kompozitburkolat²² teherviselő betonlemezének vastagságát az aszfalt kopóréteg ráépítése miatt sem csökkentik a hasonló terhelési igény-bevételű hézagaiban vasalt betonburkolatok mérten. Az ilyen burkolat kialakítását a Könyv F5.2.2 fejezete tárgyalja.

4. A vizsgált alkalmazásokhoz választható betonburkolatok építési módjai

A vizsgált alkalmazásokhoz javasolt betonburkolat megoldás a közúti alkalmazásokkal megegyezően lehet, hézagolt, vagy hézag nélküli (folytonosan vasalt) kialakítású attól függően, hogy hézagok karbantartása a tervezési időszakban milyen súllyal esik a Megrendelő által elfogadott életciklus költségek közül a latba. Az építési módot illetően az ilyen megoldások az építendő burkolat méretétől, vagy kialakítási tulajdonságaitól függően

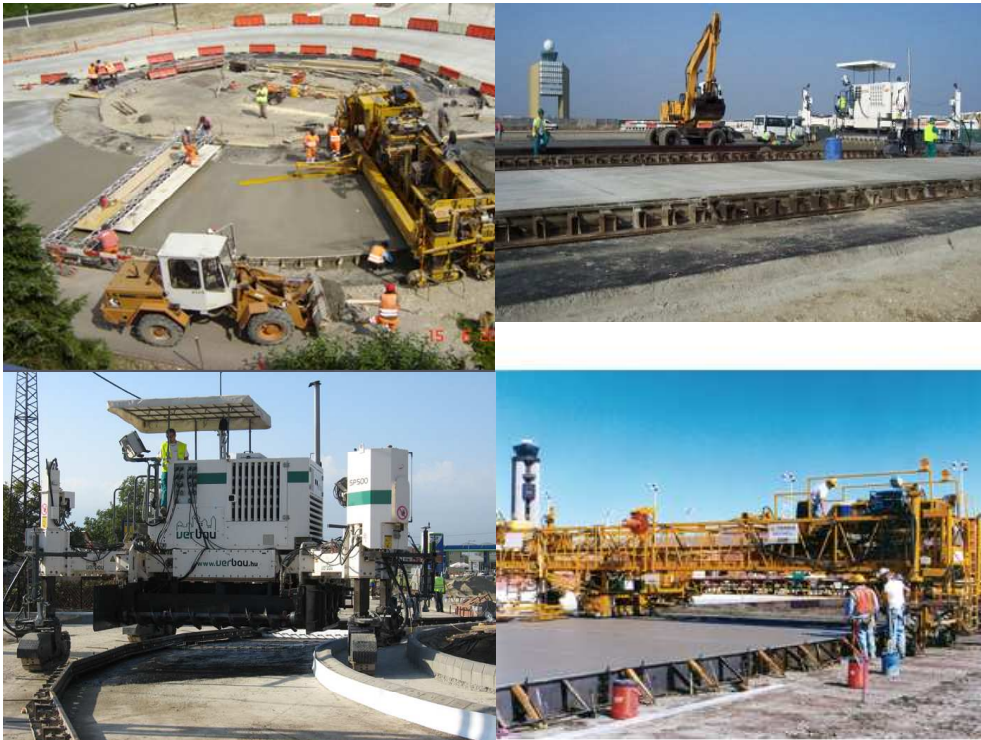
- kézi erőt, formazsalukat és kézivezetésű vibrációs kisgépeket használó (2. ábra), vagy
- a betonkeverék elterítését, tömörítését, felületképzését és utókezelést a betonlemez szélét formazsaluval (3. ábra, 5. ábra) csúszózsaluval (4. ábra) megtámasztó nagyméretű célgépekből összeállított gépláncokat használó, vagy
- a hengereltbeton építési technológiát (6. ábra) alkalmazó eljárások lehetnek.

Ezeket az eljárásokat a Könyv 10. fejezete részletezi, a betonkeverék gyártásától a hézag-képzésig bezárólag.

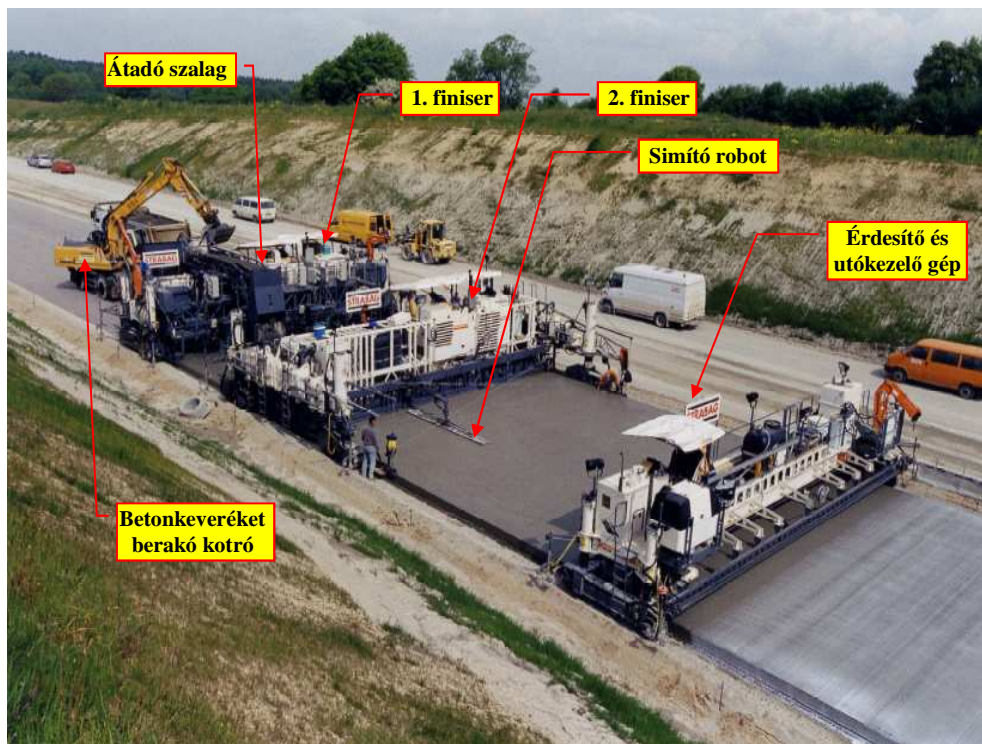


2. ábra Betonburkolat építése kézi eszközökkel (Könyv 10.1. ábra)

²² A 2013-ban érvényes magyar műszaki szabályozás (ÚT2-3.211:2006 Betonburkolatú és kompozitburkolatú útpályaszerkezetek méretezése. Magyar Útügyi Társaság) a kompozit burkolatot az E, a K és az R közúti forgalmi terhelési osztályban javasolja alkalmazhatónak.



3. ábra...Betonburkolat finiseres beépítése formazsalukkal (Könyv 10.10. ábra



4. ábra Betonburkolat építése csúszózsalsus gépláncsal (Könyv 10.15. ábra)



5. ábra Kompozitburkolat folytonosan vasalt teherviselő betonlemezének építése (Könyv 4.3. ábra)

4.1. Hengereltbeton burkolat

A hézagolt betonburkolatok egyik építési módja a hengereltbeton, amely Magyarországon még nem járatos technológia, viszont a vizsgálatunk tárgyát képező létesítmények építéséhez hatékony megoldás, ezért külön is felhívjuk rá a figyelmet.

A hengereltbeton burkolatokat – lásd a Könyv 4.4., 9.5 és 10.3.8. fejezeteit – külföldön (pl. USA, Svédország, Németország) nagy kerékterhelésű lassú járművek által használt utakon, rakodó területeken, előkészítő üzemekben (pl. fatelepeken), gyártelepeken 6. ábra), esetenként repülőterek forgalmi és műszaki előterein, parkolóiban, autópályák leállósávjaként építenek.

A hengereltbeton burkolatokhoz használt betonkeverék összetétele kis mértékben eltér a közúti és repülőtéri pályaburkolatokhoz általában használatos betonkeverékekétől. Erről a 2. előadás ad tájékoztatást.

Beépítési módszere és a burkolat hézagképzése estenként jelentősen különbözik a formaszaluk közé kézi eszközökkel, vagy csúszózsálas gépláncokkal épített hézagolt pályaburkolati betonokétól²³.

²³ Pl. Portland-ban (USA), a Nemzetközi Repülőtéren, a forgalmi előteret 1986-ban hengerelt betonburkolattal építették, ahol a beépítési sávok hosszcsatlakozásánál a hézagokat kialakították, viszont a keresztirányú hézagokat csak a napi leállásokhoz tartozó munkahézagként készítették el. A keletkezett keresztirányú repedéseket csak epoxi-gyanta kötőanyaggal kezelték azért, hogy adalékanyag szemek a forgalom hatására ne tudjanak kimozdulni



6. ábra Hengereltbeton burkolat építése iparterületen (Könyv 4.7. ábra)

A hengerelt betonburkolatokat a 10. táblázatban összefoglalt tulajdonságok és használati értékek miatt javasolják alkalmazásra²⁴. A burkolat egyenletes felületének kialakításához a $D_{\max}=22$ mm-es kövázú betonkeverékeket javasolják²⁵.

Magyarországon kísérleti burkolatként 1988-ban építettek hengerelt betonburkolatot egy fatelep a tároló-rakodó területén²⁶. Azóta Magyarországon hengerelt betonburkolat nem épült és a hengereltbeton burkolatok tervezésére és készítésére egyelőre nincs hazai műszaki szabályozás. Viszont a hazai útépitési gyakorlatban a hengereltbeton építési technológiájához hasonló technológiával készülnek a félmerev közúti pályaszerkezetek soványbeton alaprétegei a (7. ábra) a vonatkozó műszaki szabályozások²⁷ szerint. Ezeket a betonrétegeket is aszfaltfiniserrel terítik és előtömörítik, majd vibrációs hengerekkel tömörítik. A hézagokat KRAFT²⁸ módszerrel vagy vágással alakítják ki.

²⁴ Portland cement Association: Roller Compacted Concrete (RCC) Performance. 2010. info@cement.org

²⁵ Piggott, R. W.: Ten Years of Heavy-Duty Pavement in Western Canada. Roller Compacted Concrete Pavement ACI (American Concrete Institute) Compilation No. 8 1987. pp 37-42

²⁶ A 350 kg/m^3 cementtartalmú zúzottkő adalékanyaggal készített burkolati betonkeveréket földnedves konzisztenciával 15 cm vastagságban építettek be az eredetileg tervezett C8 jelű beton helyett. A betont aszfaltfiniserrel terítették el és 16 t-ás gumihengerrel valamint 8 t-ás vibróhengerrel tömörítették.

²⁷ ÚT2-3.208: 2006 Útépitési beton burkolatalapok. Tervezési előírások. Magyar Útügyi Társaság; valamint ÚT2-3.204:1993 Útépitési beton burkolatalapok. Követelmények. Magyar Útügyi Társaság

²⁸ Emlékeztetőül a módszer lényege: a félmerev pályaszerkezetek aszfaltfiniserrel elterített és előtömörített CKt, vagy soványbeton rétegbe alkalmas célgéppel 2,5 m-enként keresztthézagot alakítanak ki, amelyet a célgép rögtön bitumenemulzióval tölt ki. Ezt követően e hézag okozta egyenetlenséget simító hengerléssel tüntetik el. Lásd Könyv: 10.3.8. Hengereltbeton burkolat.

10. táblázat. A hengerelt betonburkolatok tulajdonságai és alkalmazási előnyei az amerikai gyakorlat szerint

Tulajdonság	Előny
Nagy hajlító szilárdság: 3,5-7,0 MPa	Ellenáll a nehéz és ismétlődő terheléseknek, így csökkenti a fenntartási költségeket és a hibaelhárításból következő állásidőt.
Nagy nyomószilárdság: 28-69 MPa	Ellenáll a nagy tengelysúlyú kerékkerhelésének.
Nagy ellenálló képesség a forgalom nyírási igénybevételével szemben	Megakadályozza a nyomvályú képződést, következésképpen annak megszüntetésre fordítandó javítási munkát szűkítelenné teszi.
Nagy sűrűség, kis vízfelvétel	Tartósan ellenáll a fagyási olvadási hatásoknak, a vízfelvétel károsodást nem okoz.
A keverék kis víztartalma és alacsony v/c tényezője	Növeli a terheléssel, vízzel és a kémiai hatásokkal szembeni ellenálló képességet.
Az adalékanyag szemcséinek összekapcsolódása	A hézagoknál és repedéseknél a lemezrészek között teherátadást tesz lehetővé, megakadályozva ezeken a helyeken a szabad függőleges elmozdulást vagy hézagszélek letörését.
Nincs vasháló, vagy teherátadó acélbetét igény	Felgyorsítja és egyszerűsíti az építést, csökkenti az építés költségeit
Az építés nem igényel formazsalukat vagy csúszó-zsalus finisert	Csökkenti az építés erőforrás igényét így költségeit.
Esetenként nincsenek képzett, vagy vágott hézagok	Csökkenti az építés időigényét
Kemény, időtálló, forgalombíró, világos felület	Ellenáll a forgalom abrázíós hatásának, nem igényel kopóréteget, ezzel csökkenti az építés és a fenntartás költségeit. Csökkenti a parkoló és tárolóterek megvilágítási igényét.



7. ábra Soványbeton alapréteg építése 11 m szélességben, vágott hézagokkal az M3-as autópályán. Nyíregyháza-Vásárosnamény szakaszán 2012-ben. (NIF Zrt engedélyével.)

5. Számpéldák kerékterhelésre való méretezéshez

Két elvi létesítmény pályaszerkezet tervezésére mutatunk be példát a betonburkolatok kerékterhelése való méretezésére. Az egyik egy intermodális logisztikai központ konténertároló térburkolata, a másik egy hulladékudvar térburkolata.

Mindkét esetben a 3.2.4.1. alfejezetben leírt tervezési lépéseket követjük.

5.1. Intermodális logisztikai központ konténertároló térburkolata

A térburkolatnak a tervezési élettartam alatt ellen kell állnia az időjárás és a forgalom hatásainak. A tervezés kiinduló adatait a 11. táblázat foglalja össze. A 8. ábra egy ilyen létesítményről ad áttekintést

11. táblázat Intermodális logisztikai központ konténertároló térburkolata tervezésének kiinduló adatai

Létesítmény	Intermodális logisztikai központ konténertároló
Tervezési élettartam	50 év. Időalap: évente 50 db ötnapos munkahét
Vizsgálatra javasolt pályaszerkezet és összetevői	Merev. Hengereltbeton alaprég, kétrétegű bitumenezemulzió elválasztó réteg, hézagaiban vasalt betonburkolat
Tervezési paraméter	
Földmű eredendő teherbírása, E_2	30 N/mm ²
Földmű felszínén elérendő teherbírás, E'_2	50 N/mm ²
Alapréteg anyaga és rétegmodulusa	C12/15, $E = 10\,000$ MPa;
Pályaburkolati-beton és rétegmodulusa	CP4/2,7, $E = 30\,000$ MPa
Pályaburkolati beton tervezési húzófeszültsége	5,3 MPa
Téli üzem	Hóeltakarítás hókével szerelt sósórozó gépkocsival. Burkolat fagymentesítése: a közúti üzemben használt fagyolvasztó anyagok szórása.



8. ábra. A Budapesti Logisztikai Központ

5.1.1. A mértékadó forgalom és a kerékterhelés

A logisztikai központba vasúton és közúton egyaránt érkeznek 20 és 40 láb hosszúságú konténerek. A vasúton érkezőket részben bakdaru (esetleg konténerrakodó gép) emeli le a vasúti kocsikról és rakja közvetlenül a vágány mellett álló közúti gépjárművekre, illetve konténerrakodó gép rakja (9. ábra) átmeneti tárolóba, ahonnan később szállítják el közúton, vagy ahova közúton érkezik, és később rakják onnan vasúti kocsiba.

Feltételezzük, hogy a konténertároló téren

- a szállító utaknak tekinthető sávokban engedélyezett tengelyterhelésű tehergépkocsik mozognak a betonburkolat építési sávjaival párhuzamos forgalmi irányban. Tehát ezek a burkolatszakaszok a méretezés szempontjából közútnak tekinthetők.
- napi két 8 órás műszakban összesen 300 db konténert 5 tengelyes nehézjárművek (nyergesvontató + háromtengelyes félpótkocsi) szállítják el. Ez a forgalom 50 év tervezési élettartam alatt kereken 16,4 millió egységtengely áthaladást, azaz *K* forgalmi terhelési osztályt jelent a konténertérminál bejáróútján²⁹. Ez a forgalom a konténertároló területén három megközelítő útra osztható, aminek következtében az ezen a területen a tervezési forgalom 13,7/3 ~ 4,57 millió egységtengely áthaladást, tehát *E* forgalmi terhelési kategóriát jelent. Ehhez a terheléshez megfelelő vastagságú fagyvédő rétegen 150 mm C12/15-ös alaprétegből és 230 mm Cp4/2,7 jelű hézagaiban vasalt betonburkolatból álló pályaszerkezet tartozik. Lásd: Könyv *F5.1. táblázat*.

A konténerek mozgatását (átmeneti tárolókba való elhelyezését, vagy azokból közúti, vagy vasúti járműre rakását) konténerrakodó gép³⁰ végzi, amelyik a betonburkolat építési sávjai irányában és arra merőlegesen is mozog.

A betonburkolat 5 m-es sáv szélességben, 5m×5m-es táblákra osztva, mind a kereszthézagokban, mind a hosszhézagokban teherátadó vasalással készül. (lásd Könyv 5.3.6. alfejezet.)



9. ábra... Konténerrakodó gép

²⁹ Az ÚT 2-1.202 útügyi műszaki előírás 4.2.4. pontja szerint.

³⁰ A példához választott típus: HYSTER RS 45-27 CH.

Feltételezzük, hogy

- egy $800 \text{ m} \times 90 \text{ m} = 72\,000 \text{ m}^2$ -es a konténertároló téren 40 lábas (~12 m-es) konténerből maximum 50 blokkban, blokkonként 14 db (3 oszlopos és 5 sorsos kialakítás), mindösszesen 700 db konténer tárolható;
- az összes konténerből naponta két 8 órás műszakban 300 db mozgatása az igény szállítóeszköztől vagy arra való rakodás miatt. Tehát a teljes elhelyezhető készlet 2,3 műszakonként cserélődik.
- egy konténerrakodó gép – adatai a 12. táblázatban – naponta két műszakban dolgozik és 50 perces műszakóránként maximum 10 db, műszakonként 80 db konténert tud mozgatni. Tehát a két műszak alatt 300 konténer mozgatásához $300/2 \times 80 = 1\,875$, azaz 2 db konténerrakodó gép szükséges. Ezek által lebonyolított legnagyobb forgalom a térburkolaton az 50 évre felvett tervezési időszaka alatt: $50 \text{ év} \times 50 \text{ hét} \times 5 \text{ munkanap} \times 16 \text{ műszakóra} \times 10 \text{ konténer/műszakóra} \times 2 \text{ gép} = 4\,000\,000 \text{ rakodógép mozgás}$.
- a konténerrakodó gépek mindegyike a rendelkezésre álló burkolatfelület felén dolgozik, és műszakonként egy adott burkolatsávon a konténerblokkokban elhelyezett 14 db konténer mozgatásához 28 esetben terheli ugyanazt a burkolatfelületet, mivel a 14 konténert a szállítóeszköztől leemelve el kell helyezni a blokkban, majd újabb konténer felvételéhez kell menni, vagy el kell vinni a blokkból a konténert szállítóeszközre, majd újabb konténerért kell menni a blokkhoz. Így az egy gép által 50 év alatt lebonyolított összesen $2\,000\,000 \text{ gépmozgásból}$ ($50 \text{ év} \times 50 \text{ hét} \times 5 \text{ munkanap} \times 16 \text{ műszakóra} \times 10 \text{ konténer}$) $2\,000\,000/28 = 71\,428$, kereken 74 400 gépmozgás, azaz teherismétlődési szám az, amit tervezési forgalomnak fel lehet venni egy konténerblokkhoz tartozó betonburkolat sávjában. Ebből fele terhelt, fele üres járat. A konténerrakodó gép mértékadó keréksúlya a mozgás során: $0,5 \times (439\,000 \text{ N} + 171\,000 \text{ N}) = 305\,000 \text{ N}$.

12. táblázat A konténerrakodó terhelési adatai

Konténerrakodó gép	súlya üresen/rakottan	68,5 t / 95,5 t
	tengelyszáma/ kerékszám a tengelyenként	2/2
	súlyeloszlása a tengelyek között rakottan	első: 87,8 t; hátsó kormányzott: 7,7 t
	súlyeloszlása a tengelyek között üresen	első: 37,3 t; hátsó kormányzott: 33,2 t
	terhelt tengely keréksúlya rakottan	43,9 t, azaz 439 000 N
	tengely keréksúlya üresen	17,1 t, azaz 171 000 N
	abroncsnyomása	1,0 N/mm ²

5.1.2. A földmű felső rétege, fagyvédelem

Feltételezzük, hogy a létesítmény fagyérzékeny iszapos homokból készített 2 m-nél alacsonyabb töltésben és részben sekély bevágásban, II. éghajlati zónában épül, amibe a fagybehatolás (F_a) irányértéke 550 mm (lásd 8. táblázat), és amin a földmű építése során $E_2 = 30 \text{ MPa}$ teherbírást lehet a tükörben elérni.

A forgalmat meghatározó gép ismeretében előzetesen olyan rétegvastagságú pályaszerkezetet tételezünk fel, ami a tükörszinten $E_2 \geq 50 \text{ MPa}$ tartós teherbírásra feljavított földművön fekvő

- $h_1 = 300 \text{ mm}$ C12/15 jelű hengereltbeton alaprétegből, azon utókezelő és egyben elválasztó kétrétegű bitumenemulziós rétegből,
- $h_2 = 300 \text{ mm}$ CP 4/2,7 jelű, hossz- és keresztthézagaiban egyaránt vasalt, négyzetalakú táblákra osztott betonburkolatból áll.

Ennek a pályaszerkezetnek az összvastagsága $600 \text{ mm} > 550 \text{ mm}$, tehát fagyvédő réteg beépítése nem szükséges. A földmű felső szintjén tartósan biztosítandó $E_2 \geq 50 \text{ MPa}$ teherbírást a

földmű felső 150 mm-es rétegének (lásd 6. táblázat) helyszíni cementstabilizációjával lehet előállítani.

5.1.3. Az ágyazási együttható számítása

A betonburkolat 300 mm vastagra tervezett C12/15-ös minőségű hengereltbeton alaprétege $E_{\text{felsz}} \approx (0,014 \times h + 12,0) \times E^{0,34} \approx (0,014 \times 300 + 12) \times 10000^{0,34} \approx 1237$ [MPa], amit a Könyv (5/7) képletbe beírva az ágyazási együttható $k \approx 0,0021 \times E_{\text{felsz}}^{0,86} = 0,96 \text{ N/mm}^3$ értékre adódik.

5.1.4. A hézagolt betonburkolatban keletkező feszültségek

5.1.4.1. Hőmérsékletváltozás miatti feszültségek

A burkolatba bedolgozott beton megszilárdulásakor mért hőmérsékletét tekinthetjük a nulla-feszültségi állapothoz tartozó hőmérsékletnek. Ettől a hőmérséklettől számított emelkedés nyomófeszültséget, csökkenés pedig húzófeszültséget idéz elő, ha a burkolat szabadon elmozdulni nem tud. A kétrétegű bitumenemulziós felületi bevonat a hengereltbeton alaprétegen a ráépített hézagaiban vasalt betonburkolat szabad mozgását teszi lehetővé a térburkolat dilatációs szakaszin, tehát hőmérsékletváltozás miatt a betonburkolatban nem keletkeznek feszültségek.

Ha viszont az elválasztó réteg vagy a terjeszkedési hézagok hibája miatt okokból a térburkolat bármely szakaszán a betonburkolat hőemelkedés levezetése miatt nem tudna szabadon mozogni, akkor előállhatnak hőfeszültségek. Nyáron épített betonburkolatok általában 20 és 30 °C közötti hőmérsékleten szilárdulhatnak meg. Az Országos Meteorológiai Intézet 50 vagy 100 éves megfigyelési eredményei alapján az 50 éves tervezési időtartamra figyelemmel a 30°C becsült hőmérséklet-emelkedéssel és 40°C becsült hőmérséklet-csökkenéssel számolhatunk.

A hőmérséklet emelkedés hatására kialakuló nyomófeszültség (σ_N) a 20°C nullafeszültségi állapothoz tartozóan pl. a CP4/2,7 jelű betonburkolatban a Könyv 5.1.3.1.2. alfejezetben található (5/12) összefüggésből számítjuk. Kerületi feltételek: a beton hőtágulási tényezője: $\alpha = 10^{-5}$, alakváltozási modulusa: $E = 30000 \text{ N/mm}^2$, hőmérséklet különbség: $\Delta T = 30 \text{ °C}$.

$$\sigma_N = E \times \alpha \times \Delta T = 0,3 \times 30 = 9 \text{ N/mm}^2$$

Tehát az egyenletes hőmérséklet emelkedés hatására keletkező legnagyobb nyomófeszültség a betonburkolatban kárt nem okozhat, hiszen a pályaburkolati beton előírt nyomószilárdsága 28 napos korban 45 N/mm² (lásd Könyv 9.8. táblázat).

Hézagolt betonburkolatban gátolt hőmozgás esetén a hőmérsékletnek a 40 °C-os csökkenésre ugyancsak e képlet alapján $\sigma_H = 12 \text{ N/mm}^2$ húzófeszültség léphetne fel, ami 2,26-szor haladná meg a betonburkolat húzószilárdságát (Könyv 9.8. táblázat). A táblákkal hézagokra osztott betonburkolatban a táblák alkalmasan megválasztott hossza miatt viszont ilyen feszültség nem alakul ki és a táblák lehülés miatt nem repednek el.

5.1.4.2. Vetemedési feszültség

A napi hőmérsékletingadozás következtében a betontábla felszíne és alja között „hőmérsékleti gradiens” lép fel. A felső magasabb hőmérséklet miatt a tábla felboltozódik, az önsúly miatt az alsó szálban húzófeszültség (curling stress) jön létre. A felső hidegebb zóna esetében a táblaszélek felhajlanak, az önsúly a felső szálban kelt húzófeszültséget (warping stress). A hőmérsékleti gradiens értékére nincsenek hazai mért eredmények, ezért elfogadjuk *Eisenmann* javaslatát középeurópai térségre $\Delta t = 0,09 \text{ C/cm}$ értékkel, ami meglehetősen nagy biztonságot jelent (Könyv 5.2. ábra).

A nagysúlyú konténerrakodó gép miatt a betonburkolat vastagságát 300 mm-re vesszük fel. A vetemedési feszültséget a legalkalmasabb négyzet alakú betontáblák feltételezésével számítjuk ki a Könyv 5.3.1.1.2 alfejezete szerint. A vetemedési feszültséget $L_1=L_2=5000 \text{ mm}$ -es négyzet alakú tábla esetén a Könyv (5/16) képlete szerint:

$$\sigma''_w = 14,8 \times \{(L-400)^2/h\} \times 10^{-6} = 14,8 \times \{(5000-400)^2/300\} \times 10^{-6} = \mathbf{1,04 \text{ N/mm}^2}$$

E feszültségnek 70 %-át vesszük figyelembe a teherátadásra vasalt kereszt és hosszhézagok miatt.

5.1.4.3. A szélén terhelt betontáblában ébredő húzó feszültség

A rakodógépek mozgása miatt a tábla szélén ható terhelésből ébredő húzófeszültség a mértékadó. A szélén terhelt betontáblában ébredő feszültség a Könyv (5/25) képletével számíthatjuk:

$$\sigma_{szél} = \frac{0,529 \cdot F}{h^2} \cdot (1 + 0,54 \cdot \mu) \cdot \left[\lg \left(\frac{E \cdot h^3}{k \cdot b^4} \right) + \lg \left(\frac{0,1 \cdot b}{1 - \mu^2} \right) - 1,08 \right] \text{ [N/mm}^2\text{]}, \quad (5/25)$$

Ahol: F = kerékterhelés, 439 000 N,

E = burkolati beton rugalmassági modulusa: 30 000 N/mm²

p = abroncsnyomás: 1,0 N/mm²

h = a burkolat vastagsága, 300 mm

a = terhelési kör sugara: $(F/\pi \times p)^{0,5} = (439000/3,14 \times 1)^{0,5} = 373,9 \text{ mm}$

b = $(1,6 \times a^2 + h^2)^{0,5} - 0,675 \times h = (1,6 \times 373,9^2 + 300^2)^{0,5} - 0,675 \times 300 = 212,9 \sim 213 \text{ mm}$

k = ágyazási együttható: 0,96 N/mm³,

μ = keresztirányú alakváltozási együttható: 0,15.

Az (5/25)-ös képletet a $\sigma_{szél} = C \times F/h^2$ (Könyv 5/28) összefüggésre egyszerűsítjük a Könyv 5.6. ábráját használva (10. ábra).

Ehhez a Könyv (5/19)-es képletéből számítanunk kell a tábla merevségi sugarát³¹:

$$l = \{Eh^3 / 12 \times (1 - \mu^2) \times k\}^{0,25} = \{30000 \times 300^3 / 12 \times (1 - 0,15^2) \times 0,96\}^{0,25} = 518 \text{ mm}$$

A Könyv 5.6. ábrájának használatához számítanunk kell még az l/b arányt:

$$l/b = 518/213 = 2,43, \text{ mihez tartozó } C \text{ az 9. ábrából} = 1,15.$$

Ezek alapján a $\sigma_{szél} = C \times F/h^2 = 1,15 \times 305000/300^2 = \mathbf{3,89 \text{ N/mm}^2}$ -ra adódott, aminek a 70 %-át vesszük figyelembe a teherátadásra vasalt kereszt és hosszhézagok miatt.

5.1.4.4. Az összes feszültség

Az összes feszültség a vetemedési feszültség és terhelésből adódó feszültség összege, ami a vasalt hézagok miatti teherátadást is figyelembe véve:

$$\sigma_{szél \text{ max}} = (1,04 + 3,89) \times 0,7 = 4,93 \times 0,7 = \mathbf{3,45 \text{ N/mm}^2}$$

5.1.4.5. A megengedhető feszültség

A megengedhető feszültség csökkentő tényezője N = 74 400 teherismétlődés esetén a Könyv (5/21) képlete alapján

$$\sigma_{szél \text{ max}}/f_t = 1,037 - 0,0621 \times \lg N = 1,037 - 0,0621 \times 4,87 = 0,73$$

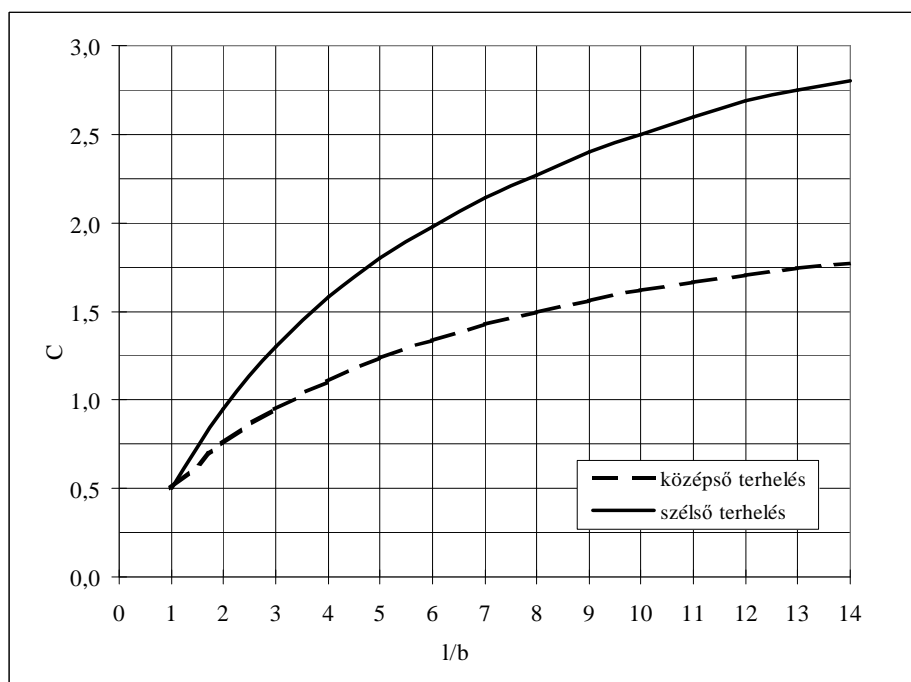
ahol N a teherismétlődések száma; $\sigma_{szél \text{ max}}$ a tábla széli vetemedési és a terhelési feszültségek összege; f_t a beton tervezési szilárdsága [N/mm²].

A megengedett feszültség tehát $\sigma_{eng} = f_t \times 0,73 = 5,3 \times 0,73 = \mathbf{3,87 \text{ N/mm}^2}$.

5.1.4.6. A pályaburkolati beton vastagságának megfelelése

Az összes hatás által keltett feszültség $\sigma_{szél \text{ max}} = 3,45 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{eng} = 3,87 \text{ N/mm}^2$, tehát a **tervezett burkolatvastagság megfelel.**

³¹ Westergaard a betonlemez végtelen hosszúságúnak tételezte fel és olyan merev hosszúsággal (merevségi hossz, vagy merevségi kör sugárral) helyettesítette, melynek közepén ható terhelés függőlegesében az igénybevételek és alakváltozások ugyanolyan értékűek, mint a rugalmasan felfekvő végtelen rendszerénél.



10. ábra A C együttható l/b -től függő értékei (Könyv 5.6. ábra)

5.2. Hulladékudvar térburkolata

Egy hulladékudvarban építmények bontásából származó építőanyag törmelék (beton, vasbeton, téglák, vakolat, kerámia burkolóanyag, kerámia szaniter) fogadására, feldolgozására és a feldolgozott törmelék értékesítés előtti deponálására betonburkolatú üzemi teret alakítanak ki (11. ábra). Egy ilyen térburkolat pályaszerkezetének tervezésére mutatunk be példaszámítást.



11. ábra Példa bontott építőanyag feldolgozására hulladékudvaron kialakított beton térburkolaton

A hulladékudvar térburkolatának a tervezési élettartam alatt ellen kell állnia az időjárás és a forgalom valamint a téli üzem hatásainak. Ehhez elegendő egy CP3,5/2,4 minőségű, kavics adalékanyagú, légpórusos hengereltbeton burkolatot előírni, amelyen a hézagokat gép-

pel vágják meg, és a hézagok nem kapnak vasalást. A burkolaton az építmények bontási anyagból tört-osztályozott adalékanyagot előállító géplánc, az ezt etető, valamint a készterméket járműre rakó gumikerekes homlokrakodó, a tört-osztályozott adalékanyagot elszállító tehergépkocsik fognak mozogni, valamint a késztermék depóniái lesznek. A térburkolat kiinduló tervezési adatait a 13. táblázat foglalja össze.

13. táblázat Hulladékudvar térburkolata tervezésének kiinduló adatai

Létesítmény	Hulladékudvar térburkolata
Tervezési élettartam	30 év
Vizsgálatra javasolt pályaszerkezet.	Merev. CKt alapréteg, kétrétegű bitumenemulzió elválasztó réteg, hengereltbeton burkolat
Tervezési paraméter	
Földmű eredendő teherbírása, E_2	30 N/mm ²
Földmű felszínén elérendő teherbírás, E'_2	50 N/mm ²
Alaprétegek anyagai és rétegmodulusai	CKt, $E = 3000$ MPa;
Pályaburkolati beton és rétegmodulusa	CP3,5/2,4; $E = 28000$ MPa
Pályaburkolati beton tervezési húzófeszültsége	4,6 MPa (Könyv 9.8. táblázat)
Téli üzem	Burkolatfelület fagymentesítése közutakon használt anyagokkal.

A pályaszerkezet méretezést a törmelék feldolgozás, illetve a feldolgozott törmelék kiszállítása okozta forgalom által támasztott igénybevételek közül a nagyobbikra végezzük el.

5.2.1. A törmelék feldolgozás okozta forgalom

Feltételezzük, hogy az építmények bontásából származó törmelék feldolgozásához egy 100 t/munkaóra teljesítményű mobil törő-osztályozó gépet használnak, amelyet egy gumikerekű homlokrakodó géppel (14. táblázat, 12. ábra) etetnek.

14. táblázat A hulladékudvaron használt gumikerekes homlokrakodó terhelési adatai

Gumikerekes homlokrakodó gép (CAT966K)	súly üresen/rakottan épülettörmelék esetén	24,7 t /31,0 t
	súly üresen/rakottan feldolgozott épülettörmelék esetén	24,7 t /31,4 t
	tengelyszáma/ kerékszám tengelyenként	2/2
	súlyeloszlása a tengelyek között rakottan	50/50 %
	terhelt tengely kerék-súly rakottan	épülettörmelék esetén 31,0/4 = 7,75t, azaz 77 500 N feldolgozott épülettörmelék esetén 31,4/4 = 7,85t, azaz 78 500 N
	terhelt tengely keréksúly üresen	24,7/4 = 6,174 t = 61 740 N
	abroncsnyomása	1,0 N/mm ²
	Kanál űrtartalom	2,5-9,2 m ³

Feltételezzük, hogy

- a törő-osztályozó gép egy műszakban 50 perces műszakórákkal dolgozik. Ez azt jelenti, hogy a rakodógépnek a műszakóránként 100 t anyagot kell a törőgépbe beraknia. 4,2 m³-es kanalat és 1,5 t/m³ térfogatsúlyú laza törmelékkel feltételezve, a rakodógép fordulóinak száma $f_{rt} = 100/4,2 \times 1,5 =$ kereken 16. Ez 50 perces műszakórában számolva ~3,1 perces ciklusidőt jelent, amin belül a rakodógép egy rakott és egy üres menetet teljesít és ez alatt $F_{rt} = 0,5 \times (77500 + 61740) = 69620$ N átlagos kerékterheléssel veszi igénybe a betonburkolatú pályaszerkezetet.
- a törmelék feldolgozás az év 5 hónapjában folyik. A 30 éves tervezési élettartam (t) alatt a rakodógép által okozott terhelési igénybevétel tehát: $N_{rt} = 30 \text{ év} \times 20 \text{ hét/év} \times 5 \text{ munkanap/hét} \times 8 \text{ műszakóra/munkanap} \times 16 \times 2 \text{ forduló} = 1\,280\,000$ forduló, aminek fele rakott, fele pedig üres.



12. ábra A számpéldában feltételezett CAT966K típusú homlokrakodó gép

5.2.2. A feldolgozott törmelék kiszállítása okozta forgalom

A feldolgozott törmelék kiszállítása okozta forgalom a rakodás és a kiszállítás okozta forgalomból áll. A pályaszerkezet méretezéshez a kettő közül a nagyobb igénybevételt fogadjuk el mértékadónak.

5.2.2.1. Készáru-rakodás

A készáru rakodását végző homlokrakodó-gépnek 4 tehergépkocsit (100 t) kell műszakóránként megrakni a térburkolat 3 rakodási sávjában. Feltételezzük, hogy a feldolgozott építési törmelék térfogatsúlya $1,6 \text{ t/m}^3$, a rakodógép kanálürtartalma $4,2 \text{ m}^3$, a műszakóránként szükséges forduló szám: $f_{rk} = 100 \text{ t/műszakóra} / 4,2 \text{ m}^3 \times 1,6 \text{ t/m}^3 = 14,9$, kereken 15, ennek fele rakott, fele üres forduló.

A rakodógép $N_{rk} = 30 \text{ év} \times 20 \text{ hét/év} \times 5 \text{ munkanap/hét} \times 8 \text{ műszakóra/munkanap} \times 15 \times 2 \text{ forduló} = 1\,200\,000$ fordulót teljesít, és ez alatt $F_{rk} = 0,5 \times (78\,500 \text{ N} + 61\,740 \text{ N}) = 70\,120 \text{ N}$ átlagos kerekterheléssel veszi igénybe a betonburkolatú pályaszerkezetet.

5.2.2.2. A készáru kiszállítás

Feltételezzük, hogy

- a mobil törő-osztályozó gép 3 frakcióba osztva 3 sávdepóniába rakja le a térburkolaton a feldolgozott építőanyag törmeléket. A depóniák mellett és között összesen 3 forgalmi sáv van, ahová a tehergépkocsik megrakás végett bejárhatnak.
- a kiszállítás az év 5 hónapjában folyik és maximális teljesítményigénye 100 t/műszakóra , ami kereken 4 db öttengelyes nyerges szerelvény (2 tengelyes nyergesvontató + 3 tengelyes félpótkocsi) forgalmát jelenti a feldolgozott törmelék depóniái közötti forgalmi sávokban. Ezek a burkolatszakaszok a méretezés szempontjából közútnak is tekinthetjük. Ez a forgalom 30 év tervezési élettartam alatt, 155 nap/év kiszállítási időalapot feltételezve, az ÚT 2-1.202 ÚME 4.2.4. pontja szerint számolva, kereken 1 millió egységtengely áthaladást jelent a térburkolaton, és 3 forgalmi sávban irányítottan bonyolódhat le, ezért ennek az igénybevételnek a harmadát, $\sim 0,33$ millió tengelyáthaladást, veszünk számításba, ami C (közepes) közúti forgalmi terhelési osztálynak fele meg.

Ehhez a forgalmi terheléshez megfelelő vastagságú fagyvédő rétegen 150 mm CKt alap-rétegből és $200 \text{ mm CP}_{3,5/2,4}$ jelű hézagolt betonburkolatból álló pályaszerkezet

tartozik (Könyv F5.1. táblázat). Valószínű, hogy a készáru-rakodást végző rakodógép mozgása ennél nagyobb igénybevételt jelent.

5.2.3. Összesített forgalom

Méretezési tervezési forgalomnak a törmelék feldolgozás és a készáru-felrakás által igényelt rakodógép forgalmat választjuk. A törmelék-feldolgozás és a készáru-felrakás összes rakodógép mozgása: $N_{\text{ö}} = N_{\text{rt}} + N_{\text{rk}} = 1\,280\,000 + 1\,200\,000 = 2\,480\,000$.

A kerékterhelési igénybevétel a rakott és üres fordulók figyelembe vételével: $0,5 \times (F_{\text{rt}} + F_{\text{rk}}) = 69\,620\text{ N} + 70\,120\text{ N} = 69\,870\text{ N}$.

5.2.4. A földmű felső rétege, fagyvédelem

Feltételezzük, hogy a létesítmény fagyveszélyes iszaptalajból készített 2 m-nél alacsonyabb töltésben és részben sekély bevágásban, III. éghajlati zónában épül, amibe a fagybehatolás (F_a) irányértéke 600 mm (lásd 8. táblázat), és amin a földmű építése során $E_2 = 30\text{ MPa}$ teherbírást lehet a tükörben elérni.

A forgalmat meghatározó gép ismeretében előzetesen olyan rétegvastagságú pályaszerkezetet tételezünk fel, ami a tükörszinten $E_2 \geq 50\text{ MPa}$ tartós teherbírástúra feljavított földművön

- 200 mm CKt jelű alaprétegből, azon utókezelő és egyben elválasztó kétrétegű bitumenemulziós rétegből,
- 200 mm Cp 3,5/2,4 jelű, hézagolt, a légpórusos hengereltbeton burkolatból áll.

Ennek a pályaszerkezetnek az összvastagsága $400\text{ mm} < 600\text{ mm}$, tehát fagyvédő réteg beépítése szükséges. Ezt a földmű felső 200 mm-es rétegének helyszíni cementstabilizációjával lehet előállítani, ami a földmű felső szintjén tartósan biztosítja az $E_2 \geq 50\text{ MPa}$ teherbírást is.

5.2.5. Az ágyazási együttható számítása

A 200 mm vastag CKt alapréteg (rétegmódulusa: $E_{\text{CKt}} = 3000\text{ N/mm}^2$) felszínén a teherbírást a Könyv (5/8) képlete szerint:

$E_{\text{felsz}} \approx (0,014 \times h + 12,0) \times E^{0,34} \approx (0,014 \times 200 + 12) \times 3000^{0,34} \approx 609\text{ MPa}$, amit a Könyv 5/7 képletbe beírva az ágyazási együttható $k \approx 0,0021 \times E_{\text{felsz}}^{0,86} = 0,52\text{ N/mm}^3$ értékre adódik.

5.2.6. A hézagolt betonburkolatban keletkező feszültségek

A hézagolt betonburkolat hengereltbeton kivitelben, 8 m-es sávszélességben, $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ -es táblákra osztva készül.

5.2.6.1. Hőmérsékletváltozás miatti feszültségek

A hőmérséklet emelkedés hatására kialakuló nyomófeszültség (σ_N) a 20°C nullafeszültségi állapothoz tartozóan pl. a CP3,5/2,4 jelű betonburkolatban a Könyv 5.1.3.1.2. alfejezetben található (5/12) összefüggésből számítjuk. Kerületi feltételek: a beton hőtágulási tényezője $\alpha = 10^{-5}$, alakváltozási modulusa $E = 28000\text{ N/mm}^2$, $\Delta T = 30^\circ\text{C}$.

$$\sigma_N = E \times \alpha \times \Delta T = 0,3 \times 28 = 8,4\text{ N/mm}^2$$

Tehát az egyenletes hőmérséklet emelkedés hatására keletkező legnagyobb nyomófeszültség a mozgásban gátolt betonburkolatban kárt nem okozhat, hiszen a Cp3,5/2,4 pályaburkolati beton előírt nyomószilárdsága 28 napos korban 40 N/mm^2 (lásd Könyv 9.8. táblázat).

Hézagolt betonburkolatban gátolt hőmozgás esetén a hőmérsékletnek a 40°C -os csökkenésre ugyancsak e képlet alapján $\sigma_H = 11,2\text{ N/mm}^2$ húzófeszültség léphetne fel, ami ~2,4-szer haladná meg a betonburkolat húzószilárdságát (lásd Könyv 9.8. táblázat). A hézagolt betonburkolatban a táblák alkalmasan megválasztott hossza miatt viszont ilyen feszültség nem alakul ki és a táblák lehülés miatt nem repednek el.

5.2.6.2. Vetemedési feszültség

A viszonylag nagysúlyú gumikerekes rakodó gép miatt a betonburkolat vastagságát 200 mm-re vesszük fel. A vetemedési feszültséget a legalkalmasabb négyzet alakú betontáblák felté-

telezésével számítjuk ki a Könyv 5.3.1.1.2 alfejezete szerint. A vetemedési feszültség $L_1 = L_2 = 4\,000$ mm-es tábla esetén a Könyv (5/16) képlete szerint:

$$\sigma''_w = 14,8 \times \{(L-400)^2/h\} \times 10^{-6} = 14,8 \times \{(4000-400)^2/200\} \times 10^{-6} = \mathbf{0,95 \text{ N/mm}^2}$$

5.2.6.3. A szélén terhelt betontáblában ébredő feszültség

A tehergépkocsik és rakodógép mozgása miatt a tábla szélén ható terhelésből ébredő húzófeszültség a mértékadó.

A szélén terhelt betontáblában a terhelésből ébredő feszültséget a Könyv (5/25) képletét a $\sigma_{szél} = C \times F/h^2$ (Könyv 5/28) összefüggésre egyszerűsítve és a Könyv 5.6. ábráját használva számíthatjuk. Bemenő adatok:

F = kerékterhelés, 69 870 N,

E = burkolati beton rugalmassági modulusa: 28 000 N/mm²

p = abroncsnyomás: 1,0 N/mm²

a = terhelési kör sugara: $(F/\pi \times p)^{0,5} = (69870/3,14 \times 1)^{0,5} = 149,2$ mm

h = a burkolat vastagsága, 200 mm

$b = (1,6 \times a^2 + h^2)^{0,5} - 0,675 \times h = (1,6 \times 149,2^2 + 200^2)^{0,5} - 0,675 \times 200 = 352,1$ mm

k = ágyazási együttható: 0,52 N/mm³,

μ = keresztirányú alakváltozási együttható: 0,15.

A C együtthatónak a Könyv 6.5 ábrája segítségével való meghatározásához számítanunk kell

- a betonburkolat merevségi sugarát a Könyv (5/19)-es képletéből:

$$l = \{Eh^3 / 12 \times (1 - \mu^2) \times k\}^{0,25} = \{28000 \times 200^3 / 12 \times (1 - 0,15^2) \times 0,52\}^{0,25} = 438 \text{ mm};$$

- az l/b arányt: $l/b = 438/140 = 3,13$, amihez tartozó C az 9. ábrából = 1,3.

Ezek alapján a $\sigma_{szél} = C \times F/h^2 = 1,3 \times 69870/200^2 = 2,27 \text{ N/mm}^2$ -ra adódott.

5.2.6.4. Az összes húzófeszültség

Az összes húzófeszültség a vetemedési feszültség és terhelésből adódó húzófeszültség összege, ami:

$$\sigma_{szél \text{ max}} = (0,95 + 2,27) = \mathbf{3,22 \text{ N/mm}^2}$$

5.2.6.5. A megengedhető húzófeszültség

A megengedhető húzófeszültség csökkentő tényezője $N = 2\,480\,000$ teherismétlődés esetén a Könyv (5/21) képlete alapján

$$\sigma_{szél \text{ max}}/f_t = 1,037 - 0,0621 \times \lg N = 1,037 - 0,0621 \times 6,39 = 0,64$$

A megengedett feszültség tehát $\sigma_{eng} = f_t \times 0,64 = 4,0 \times 0,64 = \mathbf{2,56 \text{ N/mm}^2}$.

5.2.6.6. A pályaburkolati beton vastagságának megfelelése

Az összes hatás által keltett feszültség $\sigma_{szél \text{ max}} = 3,22 \text{ N/mm}^2 > \sigma_{eng} = 2,56 \text{ N/mm}^2$, tehát a **tervezett burkolatvastagság nem felel meg, azt növelni kell.**

5.2.6.7. A növelt vastagságú hengereltbeton burkolat megfelelése

A burkolatvastagság 250 mm-re való növelése eredményeként

- a vetemedési feszültség: $\sigma''_w = 14,8 \times \{(4000-400)^2/250\} \times 10^{-6} = 0,77 \text{ N/mm}^2$;
- a tábla szélén ébredő feszültség: $\sigma_{szél} = CF/h^2 = 1,5 \times 69870/250^2 = 1,68 \text{ N/mm}^2$;
- az összes feszültség: $\sigma_{szél \text{ max}} = (0,77 + 1,68) = 2,45 \text{ N/mm}^2$;
- a megengedett feszültség változatlanul $2,56 \text{ N/mm}^2$;
- a vastagság megfelelése: az összes hatás által keltett feszültség:
 $\sigma_{szél \text{ max}} = 2,45 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{eng} = 2,56 \text{ N/mm}^2$, tehát a **250 mm vastag betonburkolat megfelel.**

Ábrák jegyzéke

1. ábra	A pályaszerkezet kiválasztásának folyamata (Könyv F2.4. ábra)
2. ábra	Betonburkolat építése kézi eszközökkel (Könyv 10.1. ábra)
3. ábra	Betonburkolat finiseres építése formazsalukkal (Könyv 10.10. ábra)
4. ábra	Betonburkolat építése csúszózsálas géplánccal (Könyv 10.15. ábra)
5. ábra	Kompozitburkolat folytonosan vasalt teherviselő betonlemezének építése (Könyv 4.3. ábra)
6. ábra	Hengereltbeton burkolat építése iparterületen (Könyv 4.7. ábra)
7. ábra	Soványbeton alapréteg építése 11 m szélességben az M3-as autópálya Nyíregyháza-Vásárosnamény szakaszán 2012-ben. (NIF Zrt engedélyével)
8. ábra	A Budapesti Logisztikai Központ
9. ábra	Konténerrakodó gép
10. ábra	A C együttható l/b-től függő értékei (Könyv 5.6. ábra)
11. ábra	Példa bontott építőanyag feldolgozására hulladékudvaron kialakított térburkolatra
12. ábra	CAT966K típusú homlokrakodó gép

Táblázatok jegyzéke

1. táblázat	A betonburkolatok alkalmazási területei
2. táblázat	Javaslat alkalmazható burkolattípusokra
3. táblázat	Az éghajlatváltozás térburkolatokra gyakorolt hatása és a lehetséges válaszok
4. táblázat	A merev pályaszerkezetek felépítése
5. táblázat	Ipari, mezőgazdasági szállítóutak és térburkolatok földműveire vonatkozó tömörségi és teherbírási követelmények a közutakra vonatkozó hazai előírások alapján
6. táblázat	Javítóréteg változatok
7. táblázat	Talajok minősítése fagyveszélyesség szempontjából
8. táblázat	Az „F _a ” fagymélység irányértéke
9. táblázat	Pályaszerkezeti rétegek fagybehatolással szembeni védőképességi tényezője
10. táblázat	A hengerelt betonburkolatok tulajdonságai és alkalmazási előnyei az amerikai gyakorlat szerint
11. táblázat	Intermodális logisztikai központ konténertároló térburkolata tervezésének kiinduló adatai
12. táblázat	A konténerrakodó terhelési adatai
13. táblázat	Hulladékudvar térburkolata tervezésének kiinduló adatai
14. táblázat	A hulladékudvaron használt gumikerekes homlokrakodó terhelési adatai