



# Vasbeton közúti hidak környezettudatos tervezése életciklus elemzés alapján

**Kővári Ákos<sup>1</sup>, Megyeri Anna Boglárka<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>UNITEF'83 Zrt.

<sup>2</sup>UNITEF Mérnök Zrt.

E-mail: [kovariakos1@gmail.com](mailto:kovariakos1@gmail.com), [megyerib@unitef.hu](mailto:megyerib@unitef.hu)

DOI: [10.36246/UL.2024.2.04](https://doi.org/10.36246/UL.2024.2.04)

## KIVONAT

Az elmúlt években az élet minden területén egyre nagyobb figyelem irányult a környezetvédelemre és a klímahatékonyra világszerte. A nagy CO<sub>2</sub> kibocsátásban érintett a közlekedési szektor és az építőipar is. Az autópálya és az autótút építések esetében a megrendelő és üzemeltető elsősorban a vasbeton szerkezeteket preferálja, így szükséges a vasbeton szerkezeink környezettudatos megújítása a klímacélok elérése érdekében.

Szerkezeink környezeti szempontból történő optimalizálásánál, különböző szerkezeti változatok összehasonlításánál célszerű a környezeti hatás mértékének számszerűsítése. Egy mérnöki létesítmény környezeti hatását mérhetjük a szerkezet teljes életciklusa (anyag előállítás, építés, fenntartás, bontás) alatt bekövetkező karbon emisszióval, amelynek mértékét – többek között – LCA (Life-Cycle Assessment – Életciklus elemzés) számítással határozhatjuk meg.

Jelen cikkben egy aktuális fejlesztésünkön keresztül mutatjuk be, hogyan hat a szerkezetválasztás a kibocsátott CO<sub>2</sub> mennyiségére a szerkezet teljes életciklusát figyelembe véve. A fejlesztést az M2 autótút Rétság elkerülő szakaszán létesítendő egyik híd tervezése során alkalmaztuk. A híd optimális kialakítását különböző hídváltozatok LCA elemzésével kerestük meg, így a tervezés során a költséghatékonyság mellett végig szem előtt tarthattuk a klímahatékonyt is.

Jelen fejlesztéssel Megyeri Anna Boglárka 1. díjat nyert a Magyar Cement-, Beton- és Mészipari Szövetség (CeMBeton), valamint a Magyar Betonelemgyártó Szövetség (MABESZ) által kiírt „Minden építés alapja – Betonpályázat 2024” c. pályázaton anyag és technológia kategóriában. A díjátadó 2024.10.04.-én volt a 2024 évi Betonfesztiválon.

*Kulcsszavak:* aléptímenyi előregyártás, LCA számítás, életciklus elemzés

## ABSTRACT

In last few years, there has been increasing attention worldwide to environmental protection and climate efficiency. The transportation sector and the construction industry are also involved in high CO<sub>2</sub> emissions. In the case of highway and road construction, the client and operator prefer reinforced concrete structures, so it is necessary to environmentally renew our reinforced concrete structure design to achieve climate goals.

When optimizing our structures from an environmental perspective and comparing different structural options, it is advisable to quantify the extent of environmental impact. The environmental impact of building a structure can be determined by the carbon emissions occurring throughout the structure's entire life cycle (material production, construction, maintenance, demolition), which can be calculated - among other methods - through Life-Cycle Assessment (LCA) calculations.

In this article, we present how structural selection affects the amount of CO<sub>2</sub> emitted over the entire life cycle of the structure. By conducting LCA analyses of different bridge designs, we identified the optimal bridge layout considering climate efficiency alongside cost-effectiveness throughout the design process.

*Keywords:* Life-Cycle Assessment, climate efficiency, precast concrete bridges

**Kővári Ákos**

Kővári Ákos (1987) MSc okl. szerkezet-építőmérnök (BME Építőmérnöki kar, 2011) hidépítési irányító tervező 2020-tól (UNITEF'83 Műszaki Tervező és Fejlesztő Zrt.) Érdeklődési területei: hidak és szerkezetek tervezése, környezettudatos hid- és szerkezetépítés, vasbeton- és acélszerkezetek, szabványosítási kérdések. Az év fiatal mérnöke (2017) Construsoft BIM Awards (2019) Közlekedési Innovációs Díj (2023) pályamunka címe: A „Csökkentett CO<sub>2</sub> kibocsátású kerékpárhidak fejlesztése”.

**Megyeri Anna Boglárka**

Megyeri Anna Boglárka (2001) BSc építőmérnök (BME Építőmérnöki kar, 2023) szerkezet-építőmérnök MSc hallgató (BME Építőmérnöki kar) statikus gyakornok (UNITEF Mérnök Zrt.) Érdeklődési területei: hidak erőtanai modellezése, VEM modellezés, vasbeton- és acélszerkezetek, a hidépítés hatása a klímaváltozás folyamataira. A 2024. évi „Minden építés alapja – Betonpályázat” I. díjasa anyag és technológia kategóriában.

---

**1. BEVEZETÉS**

Az Európai Unió a tagországok számára jogi keretekbe foglalta a klímacélok elérését [2]. A „FIT FOR 55” keretrendszer előírja a tagállamok számára, hogy az üvegház-hatású gáz-kibocsátásukat az 1990-es referenciaértékhez képest 2030-ig 55 százalékkal csökkentsék és 2050-re ériék el a klímasemlegeséget. Ez a jogszabály azt is előírja, hogy 2030-ig a tagállami jogszabályait ennek megfelelően módosítsák.

Ez a szabályozás érinti a közlekedési szektort és az építőipart is, amely leginkább az acél és cementipar által érintett a globális CO<sub>2</sub> kibocsátásban. A cementipar a globális kibocsátás 8%-ért felel, így jelentős szennyező. A cement a második legkeresettebb anyag a földön a víz után. A cementet (és a betont) a rómaiak óta használja az emberiség és napjainkban a legfontosabb építőanyaggá vált. A cementipar karbonsemleges átállásának komoly nehézsége, hogy az energiafelhasználás csak egyik komponense a kibocsátásnak. A másik a klinkergyártás során a reakcióból felszabaduló szén-dioxid. Betonszerkezetek esetén a klímacélok elérése céljából két irányban szükséges elindulni. Egyrészt a cement előállítási technológiájának átalakításával, (karbonmentes/zöld cementek, kohósalak cementek) másrészt a szerkezeteink optimalizálásával.

Tehát a közlekedés-építésben érintetteknek is át kell alakítaniuk a folyamataikat, hogy a költséghatékonyság mellett a klímahatékonyság is megjelenjen a döntési folyamatokban, üzemeltetési eljárásokban.

Az UNITEF'83 Zrt. számos autópálya, közúti, vasúti és kerékpárúti fejlesztés tervezését végezte az elmúlt évtizedekben. Az infrastruktúra-fejlesztésekhez szükséges hidak tervezése is cégünk szakterületei közé tartozik. Az elmúlt években a hidak esetében előtérbe került a teljes életciklus tekintetében a csökkentett emissziójú szerkezetek tervezése.

Az autópálya és az autót út építések esetében preferált vasbeton szerkezeteket környezettudatos megújításához hozzájárulhatunk megfelelő, helyszínhez illő szerkezeti kialakítással, illetve a szerkezet legtöbb elemének előregyártásával, amivel a helyszíni monolit betonozás mennyiségét a minimálisra szoríthatjuk.

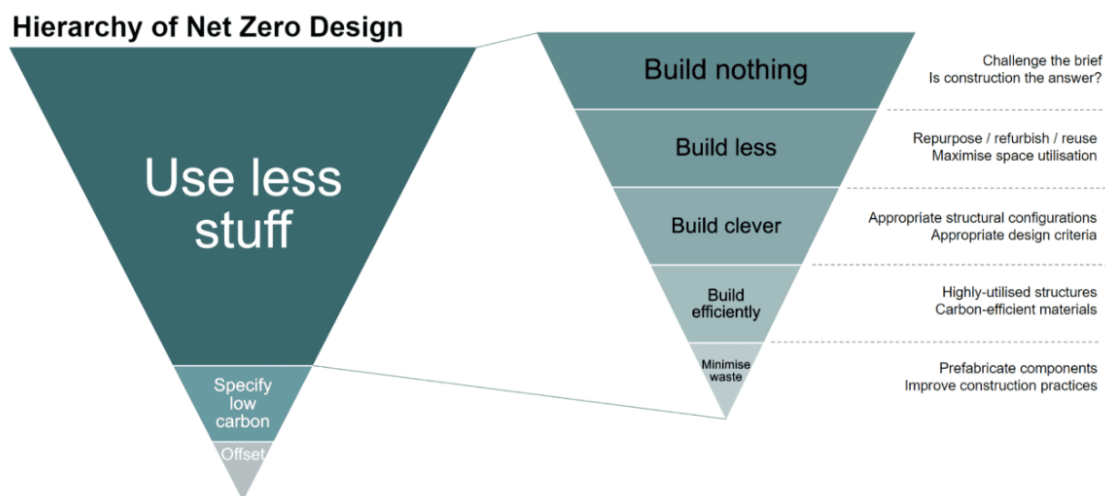
Az M2 autót út Rétság elkerülő szakaszán éppen ezért, terveink alapján egy pálya feletti keresztező híd a hagyományos (kéttámaszú, vasbeton gerendás) kialakítás helyett előregyártott elemekből felépülő – CO<sub>2</sub> kibocsátás szempontjából optimalizált – hídként valósulhat meg a jövőben. Azon kívül, hogy a híd a környezettudatosság elveinek jobban megfelel, megjelenése is sokkal kedvezőbb.

A híd konstrukciós fejlesztése során különböző hídszerkezeti változatokat hasonlítottunk össze életciklus elemzés elvégzésével, így keresve az optimális szerkezeti kialakítást.

## 2. FENNTARTHATÓ ÉPÍTÉS

Egy építkezés környezeti hatását mérhetjük a szerkezet teljes életciklusa (anyag előállítás, építés, fenntartás, bontás, rekultiváció) alatt bekövetkező karbon emisszióval. A legnagyobb károsanyagcsökkentést azáltal érhetjük el, hogy minél kevesebb anyagot használunk. A megvalósításhoz szükséges, csökkentett anyagmennyiséget a környezetre lehető legkisebb hatást kifejtő módon kell előírni, az elkerülhetetlen karbonkibocsátást pedig ellensúlyoznunk kell. A fenntartható tervezés lépéseit és azok hatásának mértékét foglalja össze az 1. ábra [1]. Az egyes lépések hatása a környezetre a háromszögben elfoglalt területükkel arányos. A tervezés során a következőket kell vizsgálni ahhoz, hogy környezeti szempontból is optimális szerkezetet tudjunk kialakítani:

- *Build nothing* – Első lépésként meg kell vizsgálnunk, hogy egyáltalán szükséges-e az építkezés, vagy elkerülhető más elemek változtatásával (pl. forgalmi rend változása).
- *Build less* – Következő lépésként törekednünk kell arra, hogy minél kisebb mértékű építéssel valósítsuk meg a szerkezetet; ha már van az építkezés helyén régebbi szerkezet, akkor vegyük figyelembe a felújításának lehetőségét, illetve törekedjünk a helyszíni adottságok megfelelő kihasználására.
- *Build clever* – Ebben a lépésben a szerkezetünk kialakításának, tervezésének optimalizálására kell törekednünk.
- *Build efficiently* – A hatékony építkezés érdekében tartsuk szem előtt, hogy a szerkezet minél jobban kihasználts legyen és alkalmazzunk minél „környezetbarátabb” anyagokat.
- *Minimise waste* – A tervezés utolsó lépéseként csökkentjük a keletkező hulladékot, amit például a kivitelezés optimalizálásával és a szerkezeti elemek előregyártásával érhetünk el.



1. ábra: Fenntartható építés hierarchiája [1].

Jelen híd tervezése során is az előbbiekben ismertetett lépéseket alkalmaztuk. Mivel a híd megvalósítása szükséges és nincs meglévő szerkezet a helyszínen, az első két lépésben (build nothing, build less) annyit tudunk tenni, hogy törekszünk a hatékony a helykihasználásra. A tervezés során több hídverziót vizsgáltunk CO<sub>2</sub> kibocsátás szempontjából, LCA (élet-ciklus) elemzéssel.

## 3. LCA (LIFE-CYCLE ASSESSMENT) ELEMZÉSE

Ebben a fejezetben a különböző hídverziók széndioxid-fókuszú összehasonlító LCA (life-cycle assessment – életciklus elemzés) elemzését mutatjuk be. Mivel a híd kivitelezésével kapcsolatosan még több információ nem ismert (pl. építés ideje, építés folyamatok, alkalmazott gépek), az élet-ciklus elemzés egy egyszerűsített változatát alkalmaztuk, azaz irodalmi adatok [3], [7], [8] alapján becsüljük

a kibocsátást [4] [5] [6]. A módszer lényege, hogy az építés, fenntartás és elbontás menetét részfolyamatokra bontjuk, melyekhez ekvivalens CO<sub>2</sub> kibocsátás rendelhető. A kibocsátás mértékegysége: tCO<sub>2</sub>/t azaz egy tonna produktum előállításához tartozó CO<sub>2</sub> emisszió. Az összkibocsátás jele: GWP (Global Warming Potential), mértékegysége: kg CO<sub>2</sub>e.

Jelen összehasonlító elemzések során négy hídverziót vizsgáltunk, amelyeknél mindig törekedtünk az előző verzióknál hatékonyabb kialakításra a 2. fejezetben bemutatott elvek szerint. Az elemzés során a különböző hídverzióknál csak az építéshez tartozó részfolyamatokat hasonlítottuk össze, a fenntartás és az elbontás részfolyamatait nem, mivel a legtöbb CO<sub>2</sub> kibocsátással az építés jár, illetve a fenntartás és bontás (és újrahasznosítás) fázisokkal kapcsolatban nagyon kevés információ áll rendelkezésünkre. A végleges, optimalizált hídverzióknál azonban elvégeztük a fenntartás és bontás részfolyamatainak közelítő elemzését is.

A számítást a UK Net Zero Bridges Group által kiadott „Carbon Calculation Guide for Bridges” [7] kiadvány alapján végeztük el. A hivatkozott kiadványban megadásra kerültek az általános építőipari folyamatok, valamint építőanyag beépítéséhez tartozóan az ekvivalens kibocsátás értékek is.

A vizsgált életciklus szakaszok (a négy verzió összehasonlításakor csak az „A”, megvalósítási fázist vizsgáljuk, a végleges, optimalizált hídverzióknál ismertetjük a „B” üzemeltetési és „C” bontási fázis közelítő számítását is):

Megvalósítási fázis (A):

- A0 – előkészítés, tervezés
- A1 – anyagnyerés
- A2 – anyagszállítás
- A3 – előregyártás folyamatai
- A4 – termékszállítás az építés helyszínére
- A5 – építés/összeszerelés/készre szerelés

Üzemeltetési fázis (B):

- B1 – használat során keletkező emisszió
- B2 – fenntartás
- B3 – javítási munkák
- B4 – elemek cseréje (pl. szigetelés)
- B5 – felújítások
- B6 – üzemelés közbeni energiaigény
- B7 – üzemelés közbeni vízigény
- B8 – egyéb üzemelési igények emissziója
- B9 – használat alatti előnyök

Bontási fázis (C):

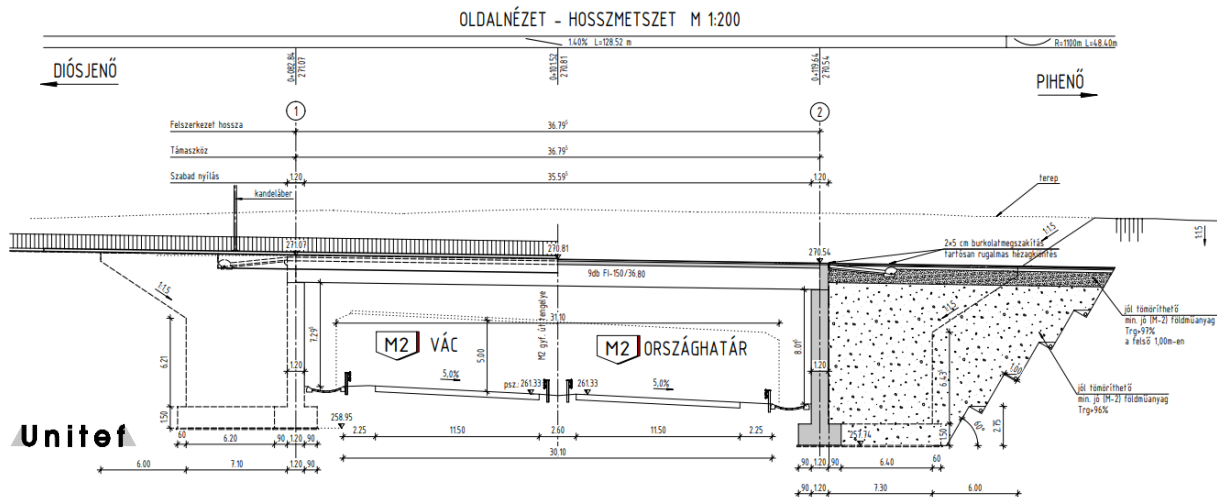
- C1 – szerkezet elbontása
- C2 – törmelékszállítás
- C3 – hulladékhasznosítás
- C4 – hulladék ártalmatlanítás

A folyamatok részletezésével és az üzemlokációk ismeretével pontosíthatjuk a számítást. Szükséges továbbá ismerni az ország energiaellátási lehetőségeit és az ezekhez tartozó karbonlábnyomok értékét. Ahol van adatunk, ott országos átlagos értékkel, ahol nincs, ott világátlag értékekkel számoltunk. A különböző híd típusok megvalósítási („A” fázis) folyamatait részfolyamatokra bontottuk, melyek az *1-4. táblázatokban* láthatók. A számítás során ezekhez a folyamatokhoz rendeltünk kibocsátás értékeket, majd ezek összegzett GWP [kgCO<sub>2</sub> e] értékeit hasonlítottuk össze, valamint az optimalizált, végleges változat esetében az üzemelés (felújítási feladatok) és bontás kibocsátás értékeit is megbecsültük.

### 3.1. VIZSGÁLT HÍDVÁLTOZATOK ÉS LCA SZÁMÍTÁSUK

#### 3.1.1. ELSŐ VERZIÓ – KÉTTÁMASZÚ, ÁLLANDÓ KERESZTMETSZETŰ HÍD

A projektben tervezett híd az M2 autópálya Rétság elkerülő szakaszon lévő Rétság-dél csomópont pálya feletti hídja. A híd a 31,10 m széles M2 autópálya felett ível majd át. Az autópálya és az autópálya építései esetében elsősorban a vasbeton szerkezetek a preferáltak, elterjedt, előregyártott és feszített gerendák (pl. FCI, FI típusok) alkalmazásával, így kiindulási alapként a lehető legrövidebb, egynyílású hídszerkezetet vettük. A nyílásban előregyártott, feszített, 36,80 m FI-150 gerendákat alkalmaztunk. A kiindulási verzió vázlatának hosszmetrióját és oldalnézetét mutatja a 2. ábra.



2. ábra: Első verzió hosszmetrióját és oldalnézetét.

Az első verzióhoz tartozó megvalósítási fázis LCA elemzését és a kibocsátás értékeit mutatja az 1. táblázat. Az egyes részfolyamatokhoz tartozó mennyiségek, tömegek és szállítási távolságok a szerkezeti méretek és a helyszín ismeretében lettek meghatározva. A normált CO<sub>2</sub> kibocsátásokat a „Carbon Calculation Guide for Bridges” [7] alapján az „ICE Handbook” [3] értékeinek felhasználásával szerepeltetjük. A szállítási adatokat is tartalmazó tevékenységeknél a transzportfolyamatokkal járó ekvivalens kibocsátási faktort is figyelembe vettük.

1. táblázat: Első verzió megvalósítási fázisának LCA elemzése.

Folyamat	Kéttámaszú, állandó keresztmetszetű híd					
	Építés			Ekvivalens CO2		
	mennyiség	tömeg	szállítás	anyag	folyamat	szállítás
<b>Terület előkészítés</b>						
Lehumuszolás	22 m <sup>3</sup>	41 t			0,08	
Földmunka	4860 m <sup>3</sup>	9234 t			10,69	
<b>Alépitmények építése</b>						
Szerelőbeton készítés	1204 m <sup>3</sup>	2890 t	24 km	318,58	11,80	8,25
Alaptest zsaluzás	176 m <sup>2</sup>				0,39	
Alaptest-betonacél	15 t	15 t	126 km	31,97	0,15	0,23
Alaptest-beton	170 m <sup>3</sup>	408 t	24 km	56,55	3,25	1,17
Hídő zsaluzása	1162 m <sup>2</sup>				2,56	
Hídő-betonacél	38 t	38 t	126 km	78,83	0,38	0,57
Hídő-beton	419 m <sup>3</sup>	1006 t	24 km	157,40	8,01	2,87
<b>Felszerkezet</b>						
Betonacélok és pászmák gyártása és szállítása FI gerendához	51 t	51 t	174 km	106,82		1,06
Előregyártott FI gerendák gyártása és szállítása	361 m <sup>3</sup>	866 t	24 km	161,01	6,90	2,62
Előregyártott FI gerendák beemelése	918 t	918 t			3,67	
Pályalemez-betonacél	16 t	16 t	126 km	33,03	0,16	0,24
Pályalemez-beton	93 m <sup>3</sup>	223 t	24 km	34,92	1,01	0,64
Pályalemez szigetelése	430 m <sup>2</sup>			2,15		
<b>Befejező műveletek</b>						
Szegély zsaluzása	258 m <sup>2</sup>				0,57	
Szegély-betonacél	2 t	2 t	126 km	5,08	0,02	0,04
Szegély-beton	27 m <sup>3</sup>	65 t	24 km	10,14	0,29	0,19
Szegély és gerendák szigetelése	415 m <sup>2</sup>			4,98		
Aszfalt burkolat	46 m <sup>3</sup>	110 t	24 km	5,73	1,11	0,31
Korlátok elhelyezése	137 m	6 t	165 km	24,66		0,13
<b>Σ A fázis</b>				1031,8 t	51,0 t	18,3 t
				1101,2 t		

### 3.1.2. MÁSODIK VERZIÓ – FERDE TÁMASZÚ HÍD

A 2. fejezetben bemutatott fenntartható tervezéshez tartozó lépések közül a *build nothing* és *build less* lépések után a *build clever* lépés következik. Ebben a lépésben egy hatékonyabb szerkezeti kialakítást vizsgáltunk kisebb gerendacsalád alkalmazásával, amit a híd nyílásának csökkentésével értünk el. A híd a 31,10 m széles M2 autót felett ível majd át, ami nagy szélességével a híd közbelső alátámasztását vonná maga után. Az egyik lehetőség az M2 autót elválasztósávjánál történő letámasztás lenne. Azonban a szűkített pályakeresztmetszet miatt az elválasztósáv csupán 2,60 m-re adódik. A szűk elválasztósávba közbelső letámasztás létesítése forgalomtechnikai okokból nem lehetséges. (Az elmúlt évek két súlyos pillérütközéses balesete – Verona, M7 Szabadbattyán – ráirányította a figyelmet a nagysebességű pillérütközések veszélyeire.) Másik lehetőség a ferde pillérek alkalmazása, amivel a közbelső nagy támaszköz lecsökkenthető, biztosítva, hogy a pillérek letámasztása az autót két szélére, az ürszelvényen kívülre essen. Ebben az esetben a ferde pillérekről

az alapozásra átadódó nagy vízszintes erők ellensúlyozására előnyös másik oldali ellentámasztást alkalmazni, ami háromnyílású hidat eredményez. Ezen kialakítás további előnye, hogy csökken a háttöltés mérete és kisebb hídfők alkalmazása is elegendő. Ezt a megoldást alkalmazva született meg a második verzió, ami egy háromnyílású híd, amelynek középső nyílásában 12 db, 30,80 m FCI-120 típusú feszített gerendát terveztünk, szélső nyílásaiban pedig a kis nyílásméret (13,00 m) miatt egyedi tervezésű, állandó keresztmetszetű, monolit híderendákat javasolunk. (a kialakítás szerkezeti rendszerét tekintve hasonlít a 8. sz. főút litéri csomópontjában épített pálya feletti hídhoz) Ezen verzió méretei nagyon hasonlítanak a végleges verzióhoz, aminek hosszmeteszete a 7. ábrán látható. A különbség a két verzió között az építési módszer mellett az, hogy ebben az esetben a pilléreknél és a szélső nyílásokban alkalmazott gerendáknál állandó (1,22 m pillérnél és 1,20 m gerendáknál) keresztmetszeti magasságot alkalmaztunk. A második verzió megvalósításának LCA számítása és kibocsátás értékei a 2. táblázatban láthatók.

A két szerkezeti változat összegzett kibocsátásértékein megfigyelhető, hogy három nyílást alkalmazva, a nyílásméret csökkentésével a CO<sub>2</sub> kibocsátás is csökkent.

2. táblázat: Második verzió megvalósítási fázisának LCA számítása.

Folyamat	Ferde támaszú híd					
	Építés			Ekvivalens CO2		
	menyiség	tömeg	szállítás	anyag	folyamat	szállítás
<b>Terület előkészítés</b>						
Lehumuszolás	90 m <sup>3</sup>	171 t			0,33	
Földmunka	4970 m <sup>3</sup>	9443 t			10,93	
<b>Alépitmények építése</b>						
Szerelőbeton készítés	17 m <sup>3</sup>	40 t	24 km	4,37	0,16	0,11
Alaptest zsaluzás	209 m <sup>2</sup>				0,46	
Alaptest-betonacél	14 t	14 t	126 km	29,25	0,14	0,21
Alaptest-beton	380 m <sup>3</sup>	912 t	24 km	126,40	7,26	2,60
Hídfo és fejgerenda zsaluzása	270 m <sup>2</sup>				0,59	
Hídfo és fejgerenda-betonacél	18 t	18 t	126 km	38,45	0,18	0,28
Hídfo és fejgerenda-beton	106 m <sup>3</sup>	253 t	24 km	39,65	2,02	0,72
Monolit pillérek zsaluzása	566 m <sup>2</sup>				1,25	
Monolit pillérek-betonacél	25 t	25 t	126 km	51,32	0,25	0,37
Monolit pillérek-beton	131 m <sup>3</sup>	314 t	24 km	49,19	2,50	0,90
<b>Felszerkezet</b>						
Betonacélok és pászmák gyártása és szállítása FCI gerendához	39 t	39 t	174 km		81,49	0,81
Előregyártott FCI gerendák gyártása és szállítása	131 m <sup>3</sup>	314 t	24 km	58,43	2,50	1,01
Előregyártott FCI gerendák beemelése	353 t	353 t			1,41	
Monolit szélső gerendák és pályalemez zsaluzása	524 m <sup>2</sup>				1,15	
Monolit szélső gerendák-betonacél	19 t	19 t	126 km	40,12	0,19	0,29
Monolit szélső gerendák-beton	96 m <sup>3</sup>	230 t	24 km	36,05	1,83	0,66
Pályalemez-betonacél	40 t	40 t	126 km	83,58	0,40	0,60
Pályalemez-beton	522 m <sup>3</sup>	1253 t	24 km	196,00	5,69	3,58
Pályalemez szigetelése	661 m <sup>2</sup>			3,31		
<b>Befejező műveletek</b>						
Szegély zsaluzása	397 m <sup>2</sup>				0,87	
Szegély-betonacél	8 t	8 t	126 km	16,72	0,08	0,12
Szegély-beton	63 m <sup>3</sup>	151 t	24 km	23,66	0,69	0,43
Szegély és gerendák szigetelése	592 m <sup>2</sup>			7,10		
Aszfalt burkolat	79 m <sup>3</sup>	190 t	24 km	9,92	1,92	0,54
Korlátok elhelyezése	198 m	9 t	165 km	35,64		0,18
<b>Σ A fázis</b>				930,6 t	42,8 t	13,4 t
				986,9 t		

### 3.1.3. HARMADIK VERZIÓ – FERDE TÁMASZÚ, VÁLTOZÓ KERESZTMETSZETŰ HÍD

Továbbhaladva a 2. fejezetben bemutatott fenntartható tervezéshez tartozó lépéseken, a *build efficiently* lépés következik. Ebben a lépésben a szerkezetet úgy optimalizáljuk tovább, hogy az állandó keresztmetszeti méretek helyett, ahol lehetséges, ott változó keresztmetszeti méret segítségével



csökkentjük az anyagfelhasználást. Ezt alkalmazva a közbenső pilléreknél a nagy nyomatékotól (fejgerendától) távolodva kisebb keresztmetszeti méretet alkalmazunk. Ehhez hasonlóan a szélső nyílásokban elhelyezett gerendáknál is csökkentjük a keresztmetszeti méretet a közbenső támaszoktól távolodva. Ezen verzió méretei megegyeznek a végleges, negyedik verzió méreteivel, aminek hosszmetzete a 7. ábrán látható, a két verzió csak az építési módban tér el. A harmadik verzió megvalósításának LCA számítását és kibocsátás értékeit mutatja a 3. táblázat.

Az eredményeken látható, hogy változó keresztmetszeti méretek alkalmazásával tovább csökkent a CO<sub>2</sub> kibocsátás.

3. táblázat: Harmadik verzió megvalósítási fázisának LCA számítása.

Folyamat	Ferde támaszú, változó keresztmetszetű híd					
	Építés			Ekvivalens CO2		
	menyiség	tömeg	szállítás	anyag	folyamat	szállítás
<b>Terület előkészítés</b>						
Lehumuszolás	90 m <sup>3</sup>	171 t			0,33	
Földmunka	4970 m <sup>3</sup>	9443 t			10,93	
<b>Alépítmények építése</b>						
Szerelőbeton készítés	17 m <sup>3</sup>	40 t	24 km	4,37	0,16	0,11
Alaptest zsaluzás	209 m <sup>2</sup>				0,46	
Alaptest-betonacél	14 t	14 t	126 km	29,25	0,14	0,21
Alaptest-beton	380 m <sup>3</sup>	912 t	24 km	126,40	7,26	2,60
Hídő és fejgerenda zsaluzása	289 m <sup>2</sup>				0,64	
Hídő és fejgerenda-betonacél	18 t	18 t	126 km	38,45	0,18	0,28
Hídő és fejgerenda-beton	110 m <sup>3</sup>	265 t	24 km	41,46	2,11	0,76
Monolit pillérek zsaluzása	526 m <sup>2</sup>				1,16	
Monolit pillérek-betonacél	21 t	21 t	126 km	43,88	0,21	0,31
Monolit pillérek-beton	112 m <sup>3</sup>	269 t	24 km	42,05	2,14	0,77
<b>Felszerkezet</b>						
Betonacélok és pászmák gyártása és szállítása FCI gerendához	39 t	39 t	174 km	81,49		0,81
Előregyártott FCI gerendák gyártása és szállítása	131 m <sup>3</sup>	314 t	24 km	58,43	2,50	1,01
Előregyártott FCI gerendák beemelése	353 t	353 t			1,41	
Monolit szélső gerendák és pályalemez zsaluzása	480 m <sup>2</sup>				1,06	
Monolit szélső gerendák-betonacél	16 t	16 t	126 km	33,43	0,16	0,24
Monolit szélső gerendák-beton	80 m <sup>3</sup>	192 t	24 km	30,04	1,53	0,55
Pályalemez-betonacél	40 t	40 t	126 km	83,58	0,40	0,60
Pályalemez-beton	522 m <sup>3</sup>	1253 t	24 km	196,00	5,69	3,58
Pályalemez szigetelése	661 m <sup>2</sup>			3,31		
<b>Befejező műveletek</b>						
Szegély zsaluzása	397 m <sup>2</sup>				0,87	
Szegély-betonacél	8 t	8 t	126 km	16,72	0,08	0,12
Szegély-beton	63 m <sup>3</sup>	151 t	24 km	23,66	0,69	0,43
Szegély és gerendák szigetelése	592 m <sup>2</sup>			7,10		
Aszfalt burkolat	79 m <sup>3</sup>	190 t	24 km	9,92	1,92	0,54
Korlátok elhelyezése	198 m	9 t	165 km	35,64		0,18
<b>Σ A fázis</b>				905,2 t	42,0 t	13,1 t
				960,3 t		

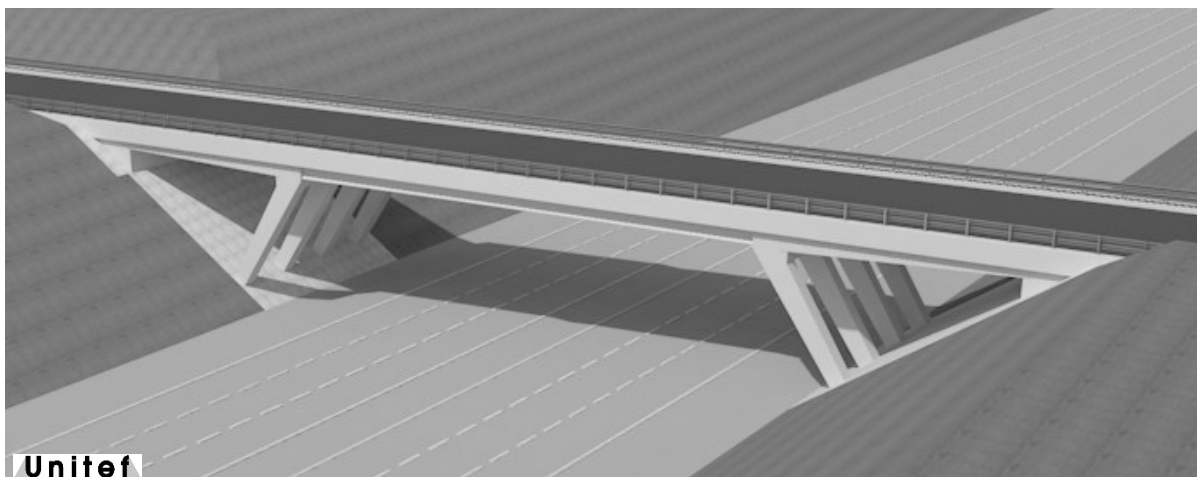
#### 3.1.4. NEGYEDIK VERZIÓ – FERDE TÁMASZÚ, VÁLTOZÓ KERESZTMETSZETŰ, ELŐREGYÁRTOTT ELEMES HÍD

A 2. bekezdésben bemutatott fenntartható tervezéshez tartozó lépések közül az utolsó, *minimise waste* lépés következik. Jelen szerkezet esetén a hulladékot úgy csökkenthetjük, hogy minél több elemet előregyártunk. Ebben a verzióban törekedtünk minél több szerkezeti elem előregyártására, így az egyedi méretű szélső nyílásban alkalmazott gerendák és a ferde pillérek ilyen módon lettek kialakítva. A negyedik verzió megvalósításának LCA számítása és kibocsátás értékei a 4. táblázatban láthatók.

Kisebb mértékben, de az előregyártásnak köszönhetően itt is megfigyelhető a CO<sub>2</sub> kibocsátás további csökkenése. A tervezés során végigvettük a 2. fejezetben bemutatott minden lépést, a bemutatott hídváltozatok közül ez az utolsó verzió a fenntarthatóság szempontjából optimális, így ez lesz a végső, tervezett kialakítás, amelynek látványképe a 3. és 4. ábrán látható.

4. táblázat: Negyedik, végleges verzió megvalósítási fázisának LCA számítása.

Folyamat	Ferde támaszú, változó keresztmetszetű, előregyártott elemes híd					
	Építés			Ekvivalens CO2		
	menyiség	tömeg	szállítás	anyag	folyamat	szállítás
<b>Terület előkészítés</b>						
Lehumuszolás	90 m <sup>3</sup>	171 t			0,33	
Földmunka	4970 m <sup>3</sup>	9443 t			10,93	
<b>Alépitmények építése</b>						
Szerelőbeton készítés	17 m <sup>3</sup>	40 t	24 km	4,37	0,16	0,11
Alaptest zsaluzás	261 m <sup>2</sup>				0,57	
Alaptest-betonacél	14 t	14 t	126 km	29,25	0,14	0,21
Alaptest-beton	380 m <sup>3</sup>	912 t	24 km	126,40	7,26	2,60
Hídő és fejgerenda zsaluzása	289 m <sup>2</sup>				0,64	
Hídő és fejgerenda-betonacél	18 t	18 t	126 km	38,45	0,18	0,28
Hídő és fejgerenda-beton	110 m <sup>3</sup>	265 t	24 km	41,46	2,11	0,76
Betonacélok és pászmák gyártása és szállítása pillérekhez	21 t	21 t	174 km	43,88		0,43
Előregyártott pillérek gyártása és szállítása	112 m <sup>3</sup>	269 t	24 km	40,45	2,14	0,83
Előregyártott pillérek beemelése	290 t	290 t			1,16	
<b>Felszerkezet</b>						
Betonacélok és pászmák gyártása és szállítása FCI gerendához	39 t	39 t	174 km	81,49		0,81
Előregyártott FCI gerendák gyártása és szállítása	131 m <sup>3</sup>	314 t	24 km	58,43	2,50	1,01
Előregyártott FCI gerendák beemelése	353 t	353 t			1,41	
Betonacélok és pászmák gyártása és szállítása szélső gerendákhoz	16 t	16 t	174 km	33,43		0,33
Előregyártott szélső gerendák gyártása és szállítása	80 m <sup>3</sup>	192 t	24 km	28,89	1,53	0,59
Előregyártott szélső gerendák beemelése	208 t	208 t			0,83	
Pályalemez-betonacél	40 t	40 t	126 km	83,58	0,40	0,60
Pályalemez-beton	522 m <sup>3</sup>	1253 t	24 km	196,00	5,69	3,58
Pályalemez szigetelése	661 m <sup>2</sup>			3,31		
<b>Befejező műveletek</b>						
Szegély zsaluzása	397 m <sup>2</sup>				0,87	
Szegély-betonacél	8 t	8 t	126 km	16,72	0,08	0,12
Szegély-beton	63 m <sup>3</sup>	151 t	24 km	23,66	0,69	0,43
Szegély és gerendák szigetelése	592 m <sup>2</sup>			7,10		
Aszfalt burkolat	79 m <sup>3</sup>	190 t	24 km	9,92	1,92	0,54
Korlátok elhelyezése	198 m	9 t	165 km	35,64		0,18
<b>Σ A fázis</b>				902,4 t	41,6 t	13,4 t
				957,4 t		



3. ábra: Végleges verzió látványképe a bevágásba illesztve.

A végleges változatnál a megvalósítási fázis CO<sub>2</sub> kibocsátásértékei mellett megbecsültük a teljes életciklusra vonatkozó üzemeltetési és bontási fázissal járó kibocsátás értékeket is, amik az 5. táblázatban láthatók.

5. táblázat: Üzemeltetési és bontási fázis LCA számítása a negyedik verzió esetén.

Folyamat	Ferde támaszú, változó keresztmetszetű, előregyártott elemes híd						
	Építés			Ekvivalens CO <sub>2</sub>			
	menyiség	tömeg	szállítás	anyag	folyamat	szállítás	
<b>Fenntartás-üzemeltetés</b>							
Bevonatsere szigetelés	- 6 /100yr	1253 m <sup>2</sup>			90,19		
Aszfaltsere aszfaltburkolat készítése	- 6 /100yr	661 m <sup>2</sup>	190 t	24 km	59,49	22,61	3,26
Korlátsere - korlátok, hálók elhelyezése	5 /100yr	198 m	9 t	165 km	178,20		0,88
<b>Σ B fázis</b>					327,9 t	22,6 t	4,1 t
					355 t		
<b>Bontás</b>							
Szerkezet bontása és hulladékelszállítás		661 m <sup>2</sup>	3712 t	50 km		2,25	22,09
Hulladék feldolgozás		538 t	538 t			7,00	
<b>Σ C fázis</b>					0,0 t	9,2 t	22,1 t
					31 t		
<b>Σ Élet-ciklus (A+B+C fázis)</b>					1230 t	73 t	40 t
					<b>1343 t</b>		

### 3.2. ÖSSZEHASONLÍTÁS, KÖVETKEZTETÉSEK

Az egyes hídváltozatok megvalósítási fázisainak összesített CO<sub>2</sub> kibocsátás értékeit és egymáshoz képesti viszonyukat mutatja a 6. táblázat.

6. táblázat: Különböző hídváltozatok CO<sub>2</sub> kibocsátásának összehasonlítása.

Verzió	Változat	eCO <sub>2</sub> [t]	CO <sub>2</sub> csökkenés verziók között [%]	CO <sub>2</sub> csökkenés 1. verzióhoz képest [%]
1	Kéttámaszú, állandó keresztmetszetű híd	1101,2	100,0%	100,0%
2	Ferde támaszú híd	986,9	89,6%	89,6%
3	Ferde támaszú, változó keresztmetszetű híd	960,3	97,3%	87,2%
4	Ferde támaszú, változó keresztmetszetű, előregyártott elemes híd	957,4	99,7%	86,9%

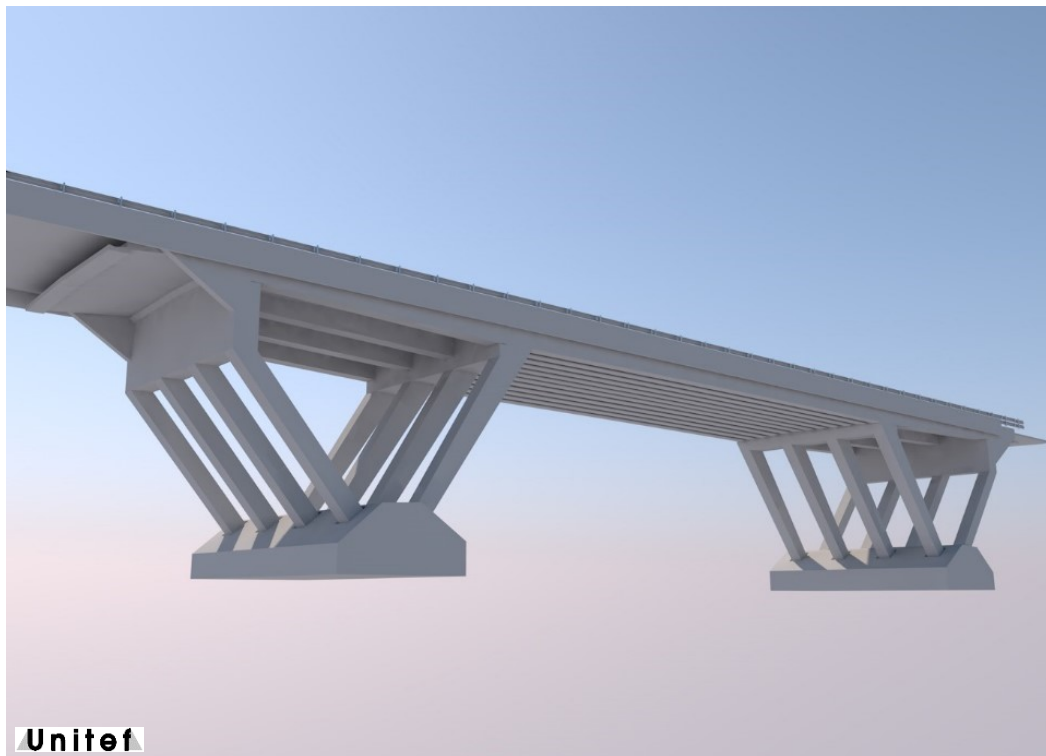
Az 1. és 2. verzió között 10,4% CO<sub>2</sub> csökkenés figyelhető meg a helyszínhez jobban illeszkedő szerkezeti kialakításnak (több nyílás, de kisebb gerendák alkalmazásának) köszönhetően. A 3. verzióban a hatékonyabb, kihasználtabb kialakítás (változó keresztmetszetek alkalmazása) további 2,7%-al csökkentette a kibocsátást. A legkisebb csökkenés a 3. és 4. változatok között figyelhető meg, amelynél az előregyártás által (kevesebb hulladékkeletkezés) újabb 0,3%-al csökkent a kibocsátás. Külön kiemelnénk, hogy csak a monolit és előregyártott elemek alkalmazását tekintve ez a csökkenés jelentősebb, 2% mértékű. Megfigyelhető, hogy az egyes változtatások hatása egyre kisebb, ami jól követi a 2. fejezetben bemutatott fenntartható tervezéshez tartozó lépések hatásának mértékét (lásd: 1. ábra). Összességében a szerkezet optimalizálásával 13,1% csökkenést tudtunk kimutatni.

## 4. HÍD RÉSZLETES BEMUTATÁSA

### 4.1. HÍD TECHNOLÓGIAI BEMUTATÁSA

A tervezett híd esetén több technológia együttes alkalmazása jelenik meg. Egyik ilyen az elem előregyártás, amivel lehetőség van feszített és lágyvasalt szerkezeti elemek kialakítására. A híd közbenső nyílásánál alkalmazott FCI gerendák Hoyer rendszerű feszítéssel készülnek, míg a pillérek, hídfőoszlopok és a kisnyílások gerendái egyedileg tervezett lágyvasalású előregyártott elemekként készülnek.

Az előregyártás mellett megjelenik a helyszíni betonozásnál alkalmazott kéregpanelek (bennmaradó) zsaluzat, melyek a szélső nyílásokban elhelyezett előregyártott gerendákra támaszkodnak fel. A kéregpanelek biztosítják a pályalemez betonozásához szükséges zsaluzatot. A kéregpanelek előnye, hogy a gerendákra támaszkodva az építés során nincs szükség állványzatra a zsaluzat tartásához, ami költség- és klímahatékony (hulladékcsökkentés, szállítás-kiváltás) megoldás. A zsaluzat bennmaradása a keletkező hulladék csökkenését is jelenti.



4. ábra: Ferde támaszú vasbeton híd szerkezeti látványképe (végleges verzió).

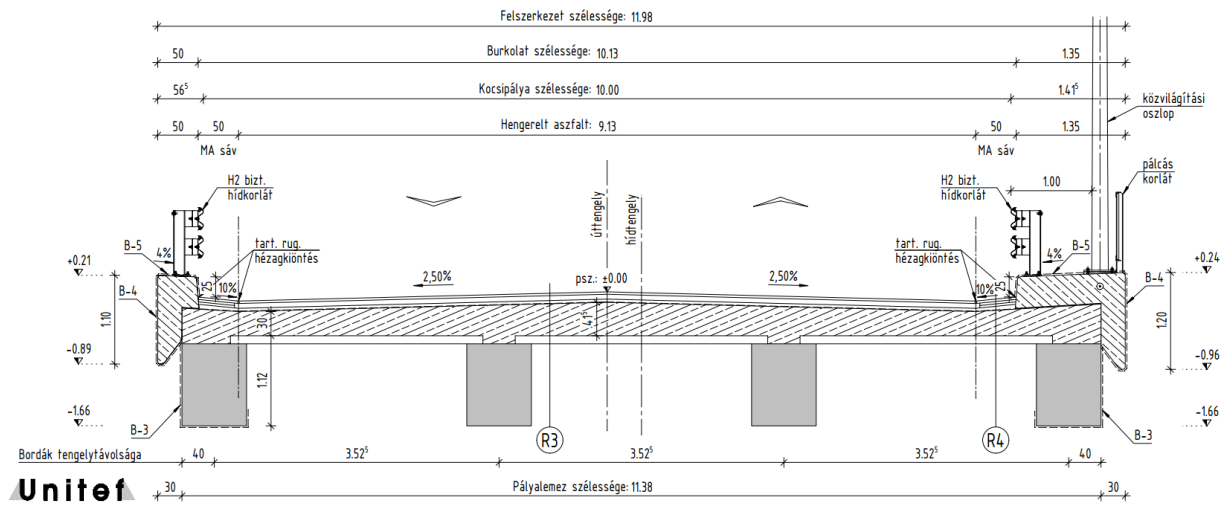
#### 4.2. FELSZERKEZET

A tervezett híd az M2 gyorsforgalmi út felett ível át, a hídtengely és az úttengely merőlegesen egymásra. A híd háromnyílású, támaszközei rendre 13,00-31,00-13,00 m. A 11,98 m széles felszerkezet gerendái előregyártottak: a középső nyílás a Ferrobeton Zrt. által gyártott 12 db, FCI-120 típusú feszített gerendából épül fel, a szélső támaszokban 4-4 egyedileg tervezett, lágyvasalt, előregyártott vasbeton gerendát helyeztünk el. A lágyvasalású gerendák a hídfőktől a közbenső támaszok felé változó magasságúak. Ez a kialakítás amellet, hogy környezeti fenntarthatóság és költséghatékonyság szempontjából kedvezőbb, mint az állandó keresztmetszet alkalmazása, az esztétikai szempontból is kedvezőbb azáltal, hogy a szélső gerendák alsó éle folytonosan csatlakozik a közbenső FCI gerendák alsó éléhez és nem törik meg a híd alsó élének vonalvezetését.

A középső nyílásban a pályalemez vastagsága 20-23 cm között változó, a szélső nyílásokban 30-41 cm között változó. A kiemelt hídszegélyek monolitikusan, helyszíni betonozással készülnek. A középső nyílásban a gerendák a pályalemez keresztelésének megfelelően vannak elhelyezve, míg a szélső nyílásokban ez vízszintes síkon történik meg. A felszerkezet egy szélső és egy közbenső nyílásban lévő keresztmetszetét mutatja az 5. és 6. ábra.

KERESZTMETSZET 1-2 TÁMASZKÖZBEN

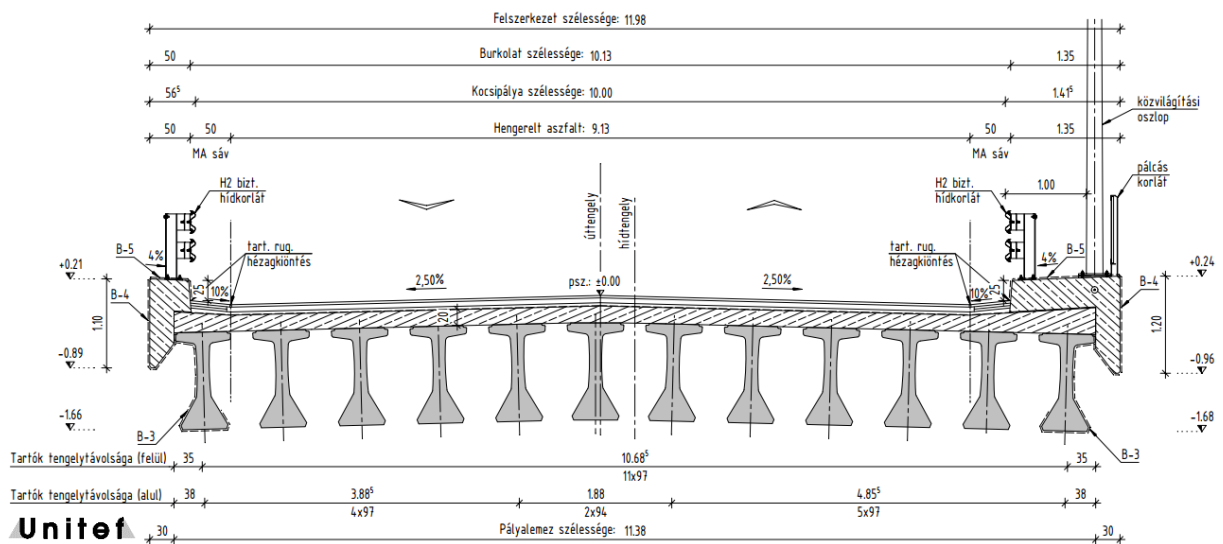
$\alpha=90,00^\circ$



5. ábra: Keresztmetszet az szélső támaszközben.

KERESZTMETSZET 2-3 TÁMASZKÖZBEN

$\alpha=90,00^\circ$



6. ábra: Keresztmetszet a középső támaszközben.



### 4.3. ALÉPÍTMÉNY

A híd tervezése során az UNITEF'83 Zrt. által már sokszor alkalmazott előregyártott felszerkezeti gerendák mellett az alépítmény egyes elemeinek előregyártása is megjelenik: A fejlesztés fókuszja a lágyvasalású gerendák mellett a hídpillérek előregyártására irányultak. A belső és külső oszlopok is előregyártással készültek.

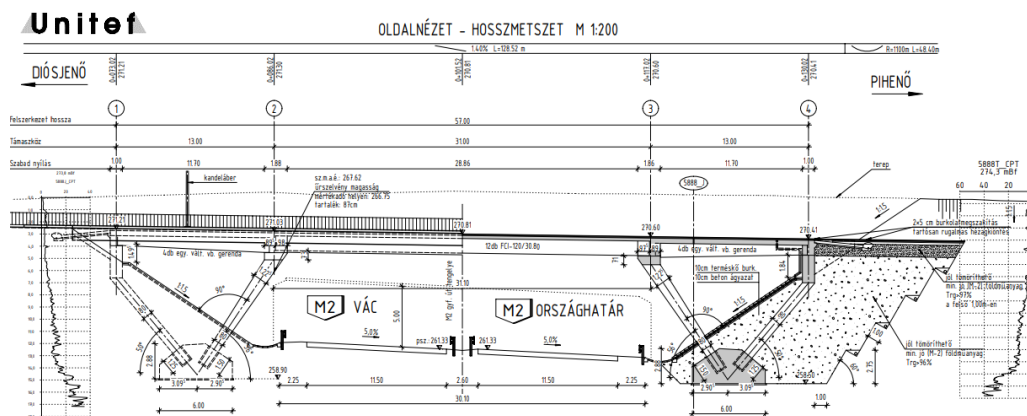
A 3. fejezetben bemutatott szerkezeti optimalizálás végeredményeként a pillérek ferdén lettek elhelyezve, amelyek helyszíni betonozása a környezetterhelésen túl építéstechnológiai szempontból egyébként is körülményes (például a ferde zsaluzás miatt), célszerű az alépítményi előregyártás alkalmazása, ami a körülményekhez illő és klímahatékony megoldásnak bizonyult. A ferde pillérek alkalmazása nem csak a fent említett biztonsági és környezethatékonsági feltételeket teljesíti, hanem az alatta áthaladó utasoknak is érdekes, harmonikus megjelenést nyújt. A közbenső támaszköz csökkenésével, kisebb méretű előregyártott gerendaelemeket kell alkalmazni, ami jelentősen megkönnyíti az elemek szállításával, emelésével és pozicionálásával járó nehézségeket.

Négy támasz esetén általában négy külön alapozást szokás alkalmazni, azonban a ferde pilléreknek és a kisebb szélső nyílásoknak köszönhetően elegendő volt két alaptest alkalmazása, így a híd bal és jobb oldalán a hídfő alatti támasz és a közbenső pillér egy-egy közös alaptestbe köt be „V” lábú keretkialakítással (lásd: 7. ábra). A (konszolidált) homokos agyag talaj jó teherbírásának köszönhetően mélyalapozás helyett síkalapok alkalmazása is megfelelő volt. Az alaptestek számának csökkentése és a síkalapozás alkalmazása a felhasznált anyagmennyiség csökkenésével jár, ami gazdaságosabb és környezeti szempontból fenntarthatóbb szerkezetet eredményez.

A síkalapok 6 m szélesek, 13,6 m hosszúak és legnagyobb magasságuk 2,88 m. A síkalapok két oldalán 4-4 kelyhet alakítottunk ki, amik az előregyártott pillérek befogadására alkalmasak.

A hídfőket alátámasztó pillérek 80x80 cm keresztmetszeti méretűek és a háttöltés alá rejtettek, a közbenső pillérek hídtengelyre merőleges mérete 80 cm, tengellyel párhuzamosan 80 cm-től 1,23 m-ig változó szélességűek, ami kiemeli a híd erőtani viselkedését.

A síkalapok, kis magasságú hídfőfalak, szárnyfalak és a közbenső pillérek fejgerendái monolit vasbeton elemek. Az alépítmény hosszmetsetét és oldalnézetét mutatja a 7. ábra.



7. ábra: Hosszmetset és oldalnézet.

### 5. MEGÁLLAPÍTÁSOK

A XXI. század legnagyobb kihívása, hogy az országok miképpen tudják kezelni a klímaváltozás hatásait. Mindemellett a változó mobilitási igények is soha nem látott feladatok elé állítják a közlekedési szakmát. A közlekedési infrastruktúra fejlesztése továbbra is szükséges, azonban a folyamataink felülvizsgálatával olyan módszereket kell bevezetnünk, amely ugyanazt a mobilitási igényt kisebb karbonlábnyom mellett teszik lehetővé.

A bemutatott híd tervezése során is olyan fejlesztési irányok alkalmazására törekedtünk, amik lehetővé teszik a karbonlábnyom csökkentését, így a tervezés során a költséghatékonyság mellett

végig szem előtt tartva a klímahatékonyt, megfelelő technológiák alkalmazásával az eredmény egy fenntarthatóbb szerkezet lett. A szerkezet kialakításának optimalizálásával, a tudatos, fenntartható tervezési lépések figyelembevételével, az előregyártás választásával és a kéregpaneles zsaluzat alkalmazásával csökkenthető a CO<sub>2</sub> kibocsátás, az anyagfelhasználás és a keletkező hulladék, valamint egy gyorsabban kivitelezhető hídszerkezet jött létre.

Olyan klímahatékony hídszerkezetet terveztünk, amelynél a felszerkezeti elemek előregyártása mellett előtérbe került az alépitmény előregyártása, ki tudunk lépni a megszokott, sablonos mintákból és egyedi tervezésű, új elemeket alkalmazhattunk, amelyekkel az adott helyszínhez illő, optimális kialakítású, esztétikus és érdekes híd jöhetett létre.

## 6. HIVATKOZÁSOK

- [1]: Arnold, W. 2024. Engineering in an Emergency, (*IABSE Symposium Manchester 2024 28-36*) ISBN 978-3-85748-204-5
- [2]: Európai Tanács, „Irány az 55%!”, *Európai klímarendelet részletei* <https://www.consilium.europa.eu/hu/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/> (hozzáférés: 2024.07.10)
- [3]: Institution of Civil Engineers, 2023. Guidance Document for PAS 2080” *Construction Leadership Council The Green Construction Board*
- [4]: Kővári, Á. 2024. Környezettudatos szerkezettervezés és anyagválasztás kerékpáros- és közúti hidak esetén, *Hidász Napok 2024*
- [5]: Kővári, Á., Németh, G. & Bartus, R. 2024. Environmentally conscious structural design and material selection of short-span bridges, (*IABSE Symposium Manchester 2024 1407-1414*) ISBN 978-3-85748-204-5
- [6]: Kővári, Á., Németh, G., & László, V. 2023. Csökkentett CO<sub>2</sub> emissziójú kerékpáros hidak fejlesztése, *Közlekedési Innovációs Díj pályamunka*
- [7]: Net Zero Bridge Group 2022. Carbon Calculation Guide for Bridges Draft 2022, [www.netzerobridges.org](http://www.netzerobridges.org) (hozzáférés: 2024.07.10)
- [8]: The Institution of Structural Engineers. 2022. How to calculate embodied carbon 2022 iStruct Guide.