

# ORTOTRÓP PÁLYASZERKEZET FÁRADÁSVIZSGÁLATA

*Mihálffy Attila<sup>\*</sup> - Joó Attila László<sup>\*\*</sup> - Dunai László<sup>\*\*\*</sup> - Dr. Szatmári István<sup>\*\*\*\*</sup>*

## RÖVID KIVONAT

A Dunaújvárosi és az M0 Autópálya Északi Duna-híd ellenőrzése során két szerkezeti részleten végeztünk fáradásvizsgálatot: a hosszborða hegesztett illesztésének, és a pályalemez-hosszborða hegesztett kapcsolatának környezetében. A feszültségek meghatározására a vizsgálatokban vége-selemes modellt alkalmaztunk. A vizsgálatok során kimutattuk, hogy a vizsgált szerkezeti részletek fáradásra megfelelnek. Elvégeztünk egy paraméteres vizsgálatot is, amelyben a pályalemez vastagításának hatását vizsgáltuk a borða gerincében keletkező hajlítófeszültségekre.

## I. BEVEZETÉS

A Dunaújvárosi és az M0 Autópálya Északi Duna-híd ortotróp pályaszerkezetében fáradás szempontjából olyan helyeket vizsgáltunk, amelyekben az egyes gépjárművek kerékterheinek hatására jelentős feszültség-ingadozás keletkezik, illetve amelyekre szerkesztési szabály betartásával – vizsgálat nélkül – nem igazolható a megfelelő fáradási élettartam. Az egyik ilyen hely a hosszborða hegesztett illesztése, a másik pedig a hosszborða és a pályalemez közötti hegesztett kapcsolat. A vizsgálat célja az volt, hogy ezekben a részletekben az Eurocode 3 [1] előírásai alapján igazoljuk a szerkezet megfelelőségét. A vizsgált szerkezeti részletek feszültségeloszlásának számításához, és a fáradásvizsgálat alapját jelentő feszültségamplitúdók meghatározásához különálló vége-selemes modelleket készítettünk.

A kijelölt szerkezeti részletek ellenőrzésétől függetlenül paraméteres vizsgálatot is végeztünk, amelyben azt vizsgáltuk, hogy a pályalemez vastagságának milyen hatása van a hosszborða – pályalemez kapcsolat környezetében kialakuló feszültségekre.

## 2. A VIZSGÁLAT ELMÉLETI HÁTTERE

Az Eurocode 3 [1] szabvány szerinti fáradásvizsgálat az adott forgalmi adatok alapján meghatározható feszültségtörténetből számított feszültség-spektrumon, illetve az ezekhez tartozó fáradást okozó ismétlésszámokon (fáradási élettartamokon) alapul. Az egyes spektrumokhoz tartozó károsodások a Palmgren-Miner elv szerint összege-zhetők.

---

\* okl. építómérnök, doktorandusz, BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke

\*\* okl. építómérnök, egyetemi tanársegéd, BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke

\*\*\* okl. építómérnök, Dr. habil, egyetemi tanár, BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke

\*\*\*\* okl. építómérnök, Dr. habil, egyetemi magántanár, BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke

Ez alapján nem következik be fáradási tönkremenetel, ha az összegzett károsodás értéke egynél kisebb.

Az egyes feszültségamplitúdók és fáradást okozó ismétlésszámok közötti kapcsolatot a szabványos Wöhler-görbék adják meg minden fáradási osztályra. Az 1. ábrán láthatók a Wöhler-görbék; a görbéket a szerkezeti részlet osztálya jellemzi, ami a 2 millió ismétlésszámhoz tartozó fáradási tartamszilárdságot adja meg. Az 5 millió ismétlésszámhoz tartozó fáradási tartamszilárdságot mind az Eurocode, mind a vonatkozó magyar szabvány állandó amplitúdójú fáradási határként definiálja.

Az Eurocode 3 [1] ajánlása szerint a szerkezetben nem következik be fáradási tönkremenetel, ha a feszültségtörténetben a változó feszültségamplitúdók egyike sem éri el az állandó amplitúdójú fáradási határt ( $\Delta\sigma_D$ -t).

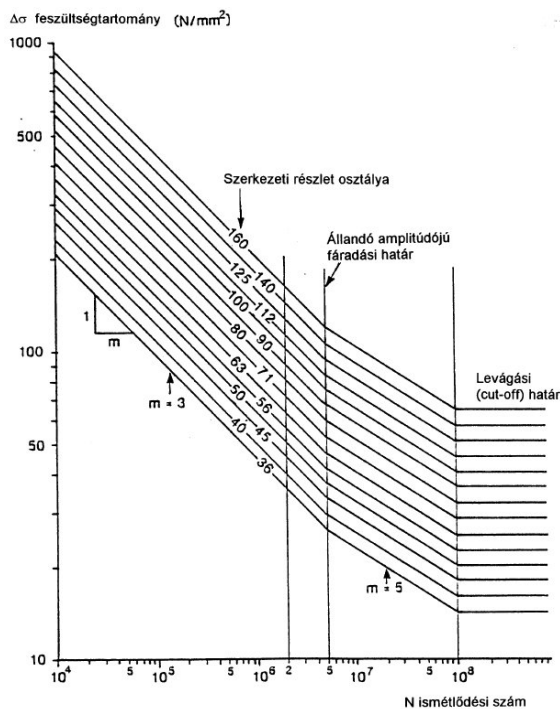
A pályaszerkezet fáradási szempontból érzékeny szerkezeti részleteinek, a hosszborða hegesztett illesztésének és a pályalemez-hosszborða hegesztett kapcsolatának fáradásvizsgálatát hajtottuk végre részletesen [3] ajánlása szerint. A 2. és 3. ábrákon láthatóak a vizsgált szerkezeti részletek, melyekhez az Eurocode 3 [1] a következő állandó amplitúdójú fáradási tartamszilárdságokat határozza meg:

Hosszborða hegesztett illesztése 71-es fáradási osztályú, ezért:

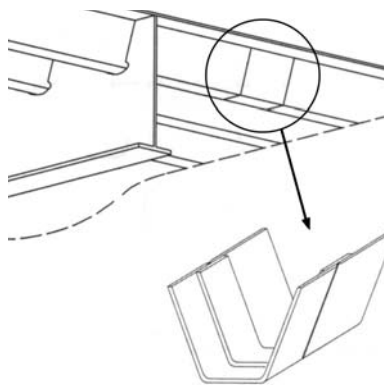
$$\Delta\sigma_D = 52 \text{ N/mm}^2$$

Pályalemez és hosszborða kapcsolata 50-es fáradási osztályú, ezért:

$$\Delta\sigma_D = 37 \text{ N/mm}^2$$



1. ábra: Szabványos Wöhler görbék



2. ábra: Hosszborða hegesztett illesztése

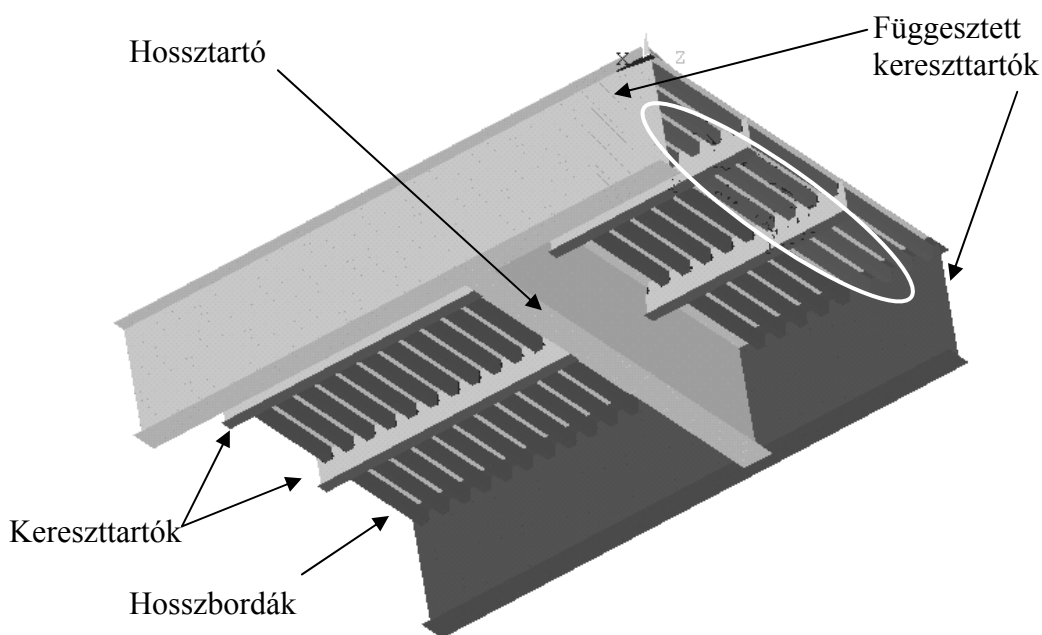


3. ábra: Pályalemez és hosszborða hegesztett kapcsolata

### 3. SZERKEZETI RÉSZLETEK – VÉGESELEM MODELLEK

#### 3.1. Az 1. modell bemutatása

Az 1. modell a hosszborða hegesztett illesztésének fáradásvizsgálatához szükséges feszültségeloszlások meghatározására készült. A vizsgált részlet a híd pályaszerkezetének két függesztett kereszttartó közé eső része. A pályaszerkezet ortotróp kialakítású, hosszirányú merevítőbordákkal. A kereszttartók távolsága 3800 mm, a hosszbordák trapéz keresztmetszetűek, egymástól 600 mm-enként helyezkednek el, felül 300 mm alul 200 mm-es mérettel, magasságuk 300 mm, vastagságuk 8 mm. A pályalemez 12 mm vastag. A híd szimmetriája, illetve a teher hatásának lokális kiterjedése miatt a vizsgálatban a pályaszerkezet fele szerepel. A modell két kereszttartó közötti részt tartalmaz: két kisebb kereszttartót, 25 hosszbordát és egy hossztartót, a járdakonzol nélküli fél pályaszerkezet szélességében. A végeelemes modell kialakítását a 4. ábra mutatja. A vizsgálat célja a hosszbordában kialakuló legnagyobb feszültségamplitúdó meghatározása, ezért a borda és környezete felületszerkezeti elemekkel, a feszültségeloszlást nem befolyásoló szerkezeti részek pedig rúdszerkezeti elemekkel lettek modellezve.



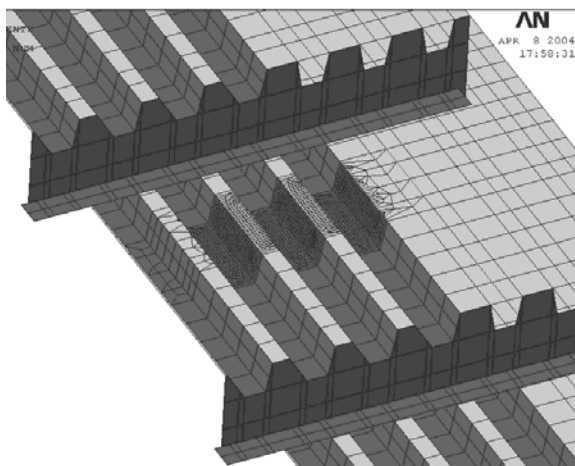
4. ábra: Hosszbordá illesztés - végeelemes modell

A felületszerkezetek végeelemes hálózatának kialakítása olyan, hogy a terhelt, illetve a vizsgált részekben jelentősen sűrűbb a hálózat. A terhek és a vizsgálati helyek egyaránt a 4. ábrán bekarikázott helyen, a harmadik hosszborða mentén helyezkednek el, így a bordának, illetve a pályalemeznek és kereszttartóknak a bordához közel eső részeinek sűrűbb a hálózata. A hálózatban a nem sűrített helyen egy-egy elem élhossza maximum 300 mm, sűrített helyen maximum 30 mm. A modell 28053 csomópontból és 38899 elemből épül fel.

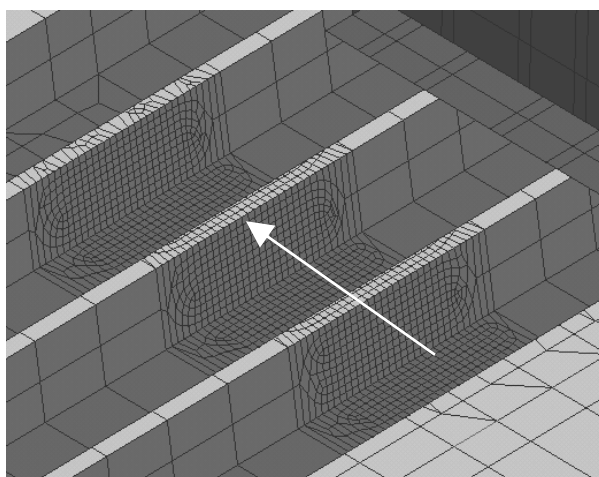
A szerkezeti részlet megtámasztását a főtartó gerince, illetve a főtartó gerincre támaszkodó keresztartók jelentik. A szimmetria miatt a keresztartók végkeresztmetszete nem fordulhat el. További megtámasztások szükségesek a hosszbordák végénél, amik a borda folytonosságát veszik figyelembe.

### 3.2. A 2. modell bemutatása

A 2. modell a pályalemez és a hosszborða hegesztett kapcsolatának fáradásvizsgálatához szükséges feszültségeloszlások meghatározására készült. A 2. modellben 25 helyett csak 7 hosszborða szerepel, de a lokális viselkedést ez nem befolyásolja. A 5. és 6. ábrákon láthatóak a modell részletei. Míg az 1. modellben a vizsgált borda teljes hosszán szükség volt a hálózat sűrítésére, addig a 2. modellben csupán közvetlenül a terhelés alatt, mivel a keréknyomás hatására, a 6. ábrán nyíllal jelölthelyen kialakuló lokális feszültségkoncentráció meghatározása volt a cél.



5. ábra Hosszborða és pályalemez kapcsolata - végeleemes modell - 1



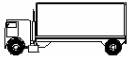


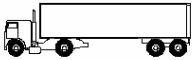
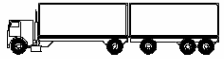
6. ábra Hosszborða és pályalemez kapcsolata - végeleemes modell - 2

A 6. ábrán a hálózat besűrítésének helye és a besűrítés mértéke látható. A hálózatban a nem sűrített helyen egy-egy elem élhossza maximum 300 mm, sűrített helyen maximum 30 mm. A modell 6011 csomópontból és 6255 elemből épül fel.

Mindkét modellt az Ansys végelelemes programban készítettük el. A felületszerkezeti elemeket a programban a SHELL181 elnevezésű 4 csomópontú héjelemekkel, a rúdként modellezett elemeket pedig a BEAM24 elnevezésű 2 csomópontú rúdelemekkel vettük fel.

## 4. FÁRADÁSI TEHERMODELL

### 4.1. Terhelés az 1. modellben

1	2	3	4
Tehergépkocsi típusa	Tengelytáv [m]	Tengelysúly [kN]	Keréktípus [kN]
	4,5	90 190	A B
	4,20 1,30	80 140 140	A B B
	3,20 5,20 1,30 1,30	90 180 120 120 120	A B C C C
	3,40 6,00 1,80	90 190 140 140	A B B B
	4,80 3,60 4,40 1,30	90 180 120 110 110	A B C C C

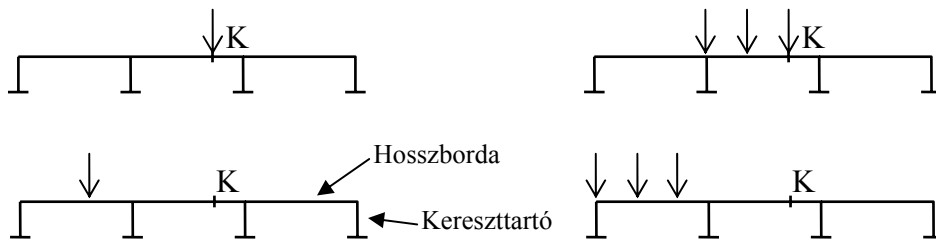
A fáradásra mértékadó járműterhet a szabvány [2] által előírt, a 7. ábrán látható 2, 3, 4 vagy 5 tengelyű tehergépkocsik eltérő terhelésű kerékterheiből származtathatjuk. A vizsgált szerkezeti részlet méreteit és a tehergépkocsik tengelytávolságát figyelembe véve az 1. táblázatban feltüntetett mértékadó kerékterhek kombinációkat származtathatjuk. A különböző jelű kerékterhek eltérő terhelését és megoszlási területét az 1. táblázat tartalmazza. A terhelés megoszlási területének meghatározásához az aszfaltréteg teherelosztó hatása miatt a kerék felfekvési területe megnövelhető 45°-os szétterjedést feltételezve.

7. ábra: Szabványos tehergépjárművek

Mindegyik teher két teheresetben kerül a szerkezetre, egyszer a maximális húzófeszültséget (8. és 9. ábrákon fent) eredményező helyzetben mezőközépi, egyszer pedig a maximális nyomófeszültséget (8. és 9. ábrákon lent) eredményező szomszédos mezőben lévő helyzetben. A 8. és 9. ábrákon a szerkezet hosszmeteszete látható, a vizsgált keresztmetszetet „K” jelöli. Azonos jelű kerékterhek nagysága járműenként eltérhet, de a vizsgálatokban – a biztonság javára tett közelítéssel – mindig a legnagyobb értékkel szerepelnek a kerékterhek.

1. táblázat: Mértékadó kerékterhek kombinációk és felfekvési felületek

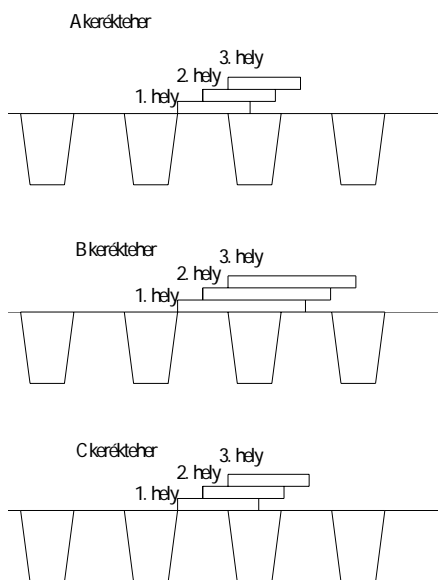
Teher sorszáma	Kerék	Terhelés nagysága	Felfekvési terület [mm]	Megoszlási terület [mm]
1.	A	35 kN	320x220	520x420
2.	B	75 kN	320x540	520x740
3.	C	45 kN	230x270	520x470
4.	B + B	2x60 kN		
5.	C + C	2x45 kN		
6.	C + C + C	3x45 kN		



8. ábra: Mértékadó teheresetek: „A” kerék

9. ábra: Mértékadó teheresetek: „C+C+C” kerék

#### 4.2. Terhelés a 2. modellben



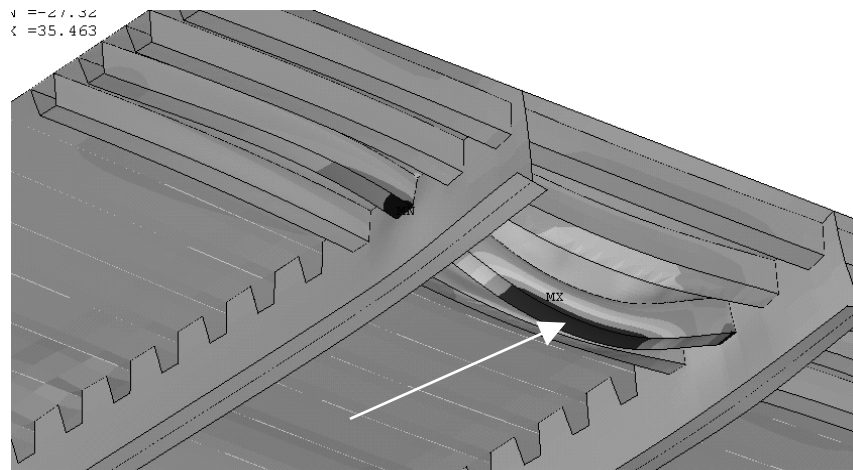
A modellben a [2] szabvány által meghatározott A, B, és C jelű kerékterhek szerepelnek. A borda és a pályalemez lokális vizsgálatoknál a teher egy kerékből származik, hiszen a távolabb eső kerekek nem okoznak lokális hajlítást, ezért a tehermodellben nem szerepelnek az 1. táblázatban lévő több kerékből álló tehercsoportok. A hossziborda feszültségeinek alakulása szempontjából nagyon jelentős a kerékterhek támadáspontjának és a borda tengelyének a helyzete, mivel a külpontos elhelyezkedés hatására a borda két gerince egyenlőtlenül terhelt. Az 10. ábrán látható a modellben alkalmazott három kerékterhek három pozíciója.

10. ábra: Kerékterhek elhelyezései

## 5. EREDMÉNYEK

### 5.1. Az 1. modell vizsgálatának eredményei

A bordaillesztés fáradásvizsgálatának elvégzéséhez szükségünk van az illesztésnél keletkező maximális húzó és nyomófeszültségekre, amikből a feszültségamplitúdókat számolhatjuk. A bordaillesztés távolsága a keresztartótól 1200 mm. A 11. ábrán nyíl jelöli a maximális húzófeszültséget adó teheresetben kialakuló legnagyobb húzófeszültség helyét.



11. ábra: Hosszirányú feszültségek az A jelű kerék első helyzetében

A feszültségamplitúdó a legnagyobb húzó- és nyomófeszültségek különbségeként számolható. A 2. táblázat tartalmazza a vizsgált helyen kialakuló maximális feszültségeket és feszültségamplitúdókat.

2. táblázat: Feszültségek a hosszborða illesztésénél

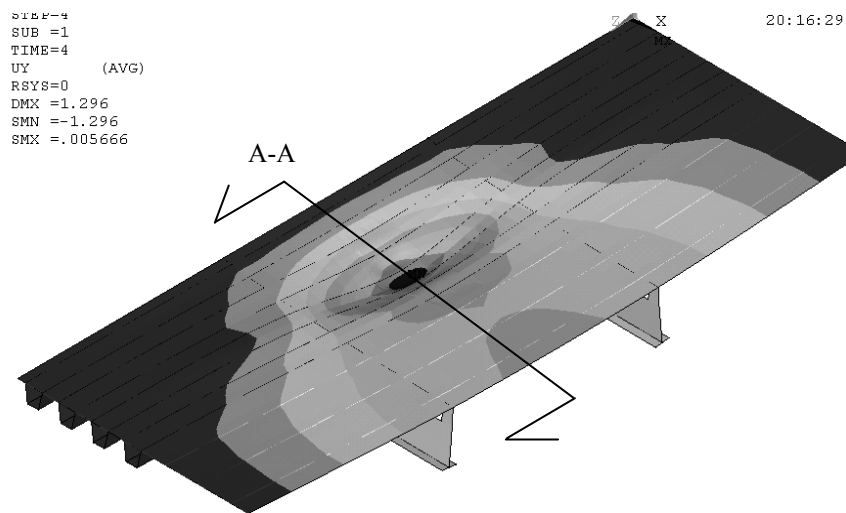
Tehereset	Húzófeszültség a vizsgált helyen [MPa]	Nyomófeszültség a vizsgált helyen [MPa]	Feszültségamplitúdó [MPa]
A	18,13	-4,57	22,70
B	27,44	-6,92	34,36
C	22,66	-5,72	28,38
B + B	32,04	-10,12	42,16
C + C	28,35	-8,89	37,24
C + C + C	28,10	-10,79	38,89

A legnagyobb húzófeszültség a kerékterhek első helyzetében, a maximális nyomófeszültség a kerékterhek második helyzetében keletkezik. Az egy kerék (vagy kerékcsoport) áthaladásakor keletkező legnagyobb nyomófeszültség és húzófeszültség

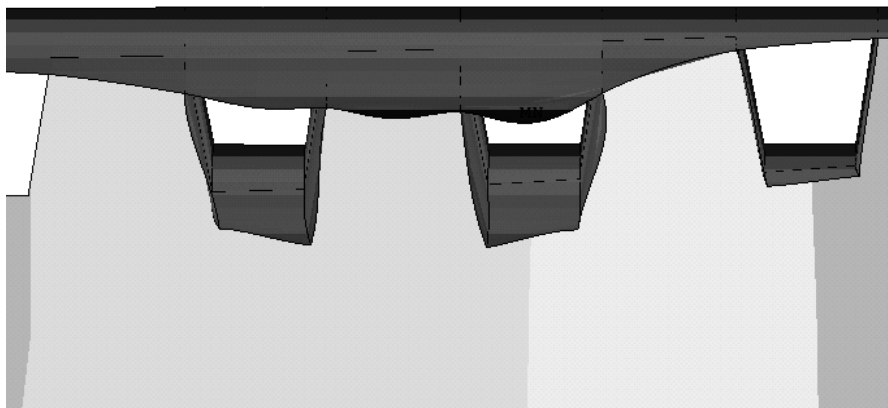
különbsége adja meg az adott teherhez tartozó feszültségamplitúdót. A legnagyobb számított feszültségamplitúdó értéke 42,16 MPa

## 5.2. A 2. modell vizsgálatának eredményei

A pályalemez és a hosszborða kapcsolatánál a borða ferde gerincében a lokális hajlítás miatt kialakuló maximális húzó és nyomófeszültséget vizsgáltuk. A 12. ábrán a „B” jelû teher esetén keletkező lehajlásokat, a 13. ábrán pedig a lokális terhelés hatására a bordákban bekövetkező deformációkat láthatjuk. A fáradásvizsgálat alapját jelentő feszültségamplitúdót ( $\Delta\sigma$ ) a legnagyobb és a legkisebb feszültség különbségeként kaphatjuk meg. Egy kerék áthaladásakor a keresztirányú feszültség nulláról növekszik, eléri a maximumát, majd visszacsökken nullára. Ennek értelmében a legkisebb feszültség a nulla, a legnagyobb feszültség pedig a kialakuló maximális feszültség, vagyis a feszültségamplitúdó értéke megegyezik a kialakuló, abszolút értékben legnagyobb feszültséggel.



12. ábra: Lehajlás az 1. helyen lévő B jelű kerékterherből



13. ábra: A bordák deformációja az A-A metszetben



Az egyes kerékterhelések esetén a három kerékhelyzetben keletkező maximális feszültségeket kigyűjtöttük a 3. táblázatba. A hosszborða gerincében a hegesztés környezetében keletkező legnagyobb feszültség a C kerék harmadik helyzetében fordul elő, értéke 31,64 MPa.

3. táblázat: Feszültségek [MPa] a kilenc teheresetben

„A” kerék			„B” kerék			„C” kerék			Max
1. hely	2. hely	3. hely	1. hely	2. hely	3. hely	1. hely	2. hely	3. hely	
6.23	-14.6	-27.34	-12.48	-21.58	-30.83	0.92	-19.27	-31.64	31.64

Elvégeztünk egy paraméteres vizsgálatot, amelyben azt vizsgáltuk, hogy a pályalemez vastagításának milyen hatása van a pályalemez - hosszborða kapcsolatánál kialakuló feszültségekre. A hosszborðák vastagsága állandó 8 mm volt, a pályalemez vastagsága pedig 10-12-14 mm-es értéket vett fel. Az eredményeket a 4. táblázatban foglaltuk össze. A feszültségi értékeket a hosszborða ferde gerincében számítottuk a hegesztés környezetében, a borða külső és belső oldalán, a „B” kerék 10. ábrán bemutatott helyzetében.

4. táblázat: A paraméteres vizsgálat eredményei

	„B” kerékterhelés					
	1. kerékhelyzet		2. kerékhelyzet		3. kerékhelyzet	
	Belül	Kívül	Belül	Kívül	Belül	Kívül
	feszültségek [MPa]		feszültségek [MPa]		feszültségek [MPa]	
<b>10 mm</b>	-12.56	-4.57	-35.77	23.06	-32.87	29.79
<b>12 mm</b>	-12.67	-4.42	-30.27	17.71	-27.71	24.64
<b>14 mm</b>	-12.24	-4.76	-26.52	14.1	-24.36	21.27
<b>10 mm</b>	99	103	118	130	119	121
<b>12 mm</b>	100	100	100	100	100	100
<b>14 mm</b>	97	108	88	80	88	86

A 4. táblázat alsó három sorában a 12 mm-es pályalemez esetén keletkező feszültségi értéktől való százalékos eltérés található. A legnagyobb eltérést a 2. kerékhelyzetben találjuk, itt 18-30%-os növekedést, illetve 12-20%-os csökkenést okoz a vastagság változtatása. Ennek oka, hogy ebben a kerékhelyzetben van kitéve a borða lemeze a legnagyobb hajlításnak. Az 1. kerékhelyzetben a különböző vastagságok esetén a feszültségek gyakorlatilag változatlanok, ami annak köszönhető, hogy ebben a kerékhelyzetben az eredő erő körülbelül a borða vonalára esik, vagyis a lokális lemezahajlításból kevés feszültség keletkezik. Ez a feszültségi értékekből is leolvasható, hiszen az első kerékhelyzetben a borða külső és belső oldala is nyomott, míg a másik két helyzetben az egyik oldal nyomott, a másik húzott.

## 6. FÁRADÁSVIZSGÁLAT – KÖVETKEZTETÉSEK

A hosszborða illesztés [2] és [3] szerint a 71-es fáradási osztályba tartozik, az ehhez tartozó állandó amplitúdójú fáradási határ 52 MPa; mivel a legnagyobb számított feszültségamplitúdó értéke 42,16 MPa, a szerkezeti részlet fáradásra megfelel.

A pályalemez és hosszborða sarokvarratos kapcsolata [2] és [3] szerint az 50-es fáradási osztályba tartozik, az ehhez tartozó állandó amplitúdójú fáradási határ 37 MPa. Mivel a legnagyobb feszültségamplitúdó értéke 31,64 MPa, a szerkezeti részlet fáradásra megfelel.

A paraméteres vizsgálat eredményeiből megállapítottuk, hogy a pályalemez 12 mm-ről 14 mm-re való vastagítása 20%-os mértékben csökkenti a bordában a helyi hajlításból származó feszültségeket. A csökkenés értéke akkor jelentős, ha a kerék a bordára aszimmetrikusan helyezkedik el, ugyanis ekkor keletkezik jelentős hajlítás. Megjegyzendő azonban, hogy a 10 mm-es pályaelem esetén sem okoz a „B” kerék az állandó amplitúdójú fáradási határt elérő feszültségamplitúdót.

### HIVATKOZÁSOK

- [1] prEN 1993-1-9: Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-9: Fatigue; Final Draft, December 2003.
- [2] ÚT 2-3.413 Közúti hidak tervezési előírásai III. Közúti acélhidak tervezése, Útügyi Műszaki Előírás, 2002.
- [3] prEN 1993-2: Eurocode 3: Design of steel structures Part 2: Steel Bridges; Final Draft, February 2003.