



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

TDK Dolgozat

**Vasbeton körüreges fűdempallók numerikus és kísérleti vizsgálata**

2021/2022 I. Félév

Készítette:

Rutterschmidt Dávid

Konzulensek

Dr. Haris István

Roszevák Zsolt

## Összefoglaló

Feladat: Vasbeton körüreges födempallók numerikus és kísérleti vizsgálata

Készítette: Rutterschmidt Dávid

Konzulensek: Dr. Haris István

Roszevák Zsolt

A TDK szakdolgozatom tanulmány részében bemutatom mindazt, ami az előregyártással kapcsolatos, azon belül is specifikusan az előregyártott pallóra vonatkozó fontosabb részeket. Rövid történeti áttekintés után az előregyártás előnyeiről és hátrányairól számolok be, majd a hátrányból adódó problémák megoldását taglalom (szállítási nehézségek, emelési nehézségek, beépítési lehetőségek). Magyarországon kereskedelmi forgalomban elérhető előfeszített körüreges födempallók gyártóinak ajánlásait, mind a beépítésre, elhelyezésre vonatkozóan demonstrálom.

A TDK szakdolgozat alapját, egy a Ferrobeton Zrt. által végrehajtott FF500 jelű egyedi körüreges födempalló próbaterhelési kísérlet eredménye adja. Bemutatom a kísérlet során alkalmazott terhelési eseteket, terhelési lépcsőket, valamint a kísérlet menetét.

A kézhez kapott nyers kísérleti eredmények alapos és megfontolt kiértékelése után elállítottunk egy erő-eltolódás diagramot, amelyet felhasználva validálni lehetett egy numerikus kísérleti eredményt.

Egy fejlett 3D nemlineáris végelelemes program segítségével numerikus modellt fejlesztettem, ami a lehető legpontosabban próbálja meg leírni a valóságot. A feszített szerkezet viselkedése merőben eltér egy lágyvasalású szerkezettől, ezért elengedhetetlen, hogy a numerikus modell kezelni tudja az összetettebb viselkedést.

A kitűzött célok:

- Kifejleszteni egy numerikus modellt, ami a valóságot kellő pontossággal leírja.
- Megfelelő anyagmodellek definiálása annak érdekében, hogy egy esetleges későbbi paramétervizsgálattal pontosabb eredmények legyenek elérhetők.
- A feszítés helyes numerikus modellezése.
- Az elért eredmények felhasználásával további pallók numerikus modellezése, keresztmetszet optimalása.

## Summary

The task: Numerical and experimental investigation of reinforced concrete hollow core slabs

Author: Dávid Rutterschmidt

Consultant: István Haris, Phd  
Zsolt Roszevák

In the study part of my SSA dissertation, I present everything that is related to prefabrication, especially the most important parts related to prefabricated hollow-core slabs. After a brief historical overview, I present the advantages and disadvantages of prefabrication, and then discuss the solution of the problems arising from the disadvantages (transport difficulties, lifting difficulties, installation possibilities). I demonstrate the recommendations of the manufacturers of prestressed hollow-core slabs commercially available in Hungary, both for installation and placement.

The basis of the SSA thesis is given by the result of a FF500 hollow-core slab test load performed by Ferrobeton cPlc. I present the load cases used during the experiment, load steps, and the course of the experiment. After a thorough and considered evaluation of the raw test results obtained, a force-displacement diagram was generated, which could be used to validate the numerical result.

Using an advanced 3D-nonlinear finite element program, I developed a numerical model that attempts to describe reality as accurately as possible. The behavior of a prestressed structure is radically different from that of a cast-in-situ reinforced concrete structure, so it is essential that the numerical model will be able to handle a more complex behavior.

The set goals:

- Develop a numerical model that describes reality accurately enough.
- Define appropriate material models in order to obtain more accurate results for a possible parameter analysis in the future.
- Correct numerical modeling of prestressing.
- Numerical modeling of other planks and cross-section optimization using the obtained results.

## TARTALOMJEGYZÉK

1. ELŐREGYÁRTÁS.....	5
1.1. Bevezetés .....	5
1.2. Előregyártás előnyei.....	7
1.3. Előregyártás hátrányai.....	7
1.4. Körüreges födempallók.....	8
1.4.1. Szállítási lehetőségek.....	8
1.4.2. Emelési lehetőségek .....	10
1.4.3. Deponálási lehetőségek .....	12
1.4.4. Szokványos beépítés.....	12
1.4.4.1. Általános ismertetés .....	12
1.4.4.2. Keresztirányú együttdolgozás .....	14
1.4.4.3. Áttörések kialakítása .....	14
1.4.4.4. Jellemző csomóponti kialakítások.....	15
1.4.4.5. Helyszíni betonozás .....	16
2. SZAKIRODALMI KUTATÁS.....	17
3. CÉLKITŰZÉSEK .....	18
4. KÍSÉRLETI ÉS TERHELÉSI ELRENDEZÉS .....	19
5. NUMERIKUS MODELL .....	21
5.1. Alkalmazott szoftver .....	21
5.2. Modell felépítése.....	22
5.2.1. Geometriai kialakítás .....	22
5.2.2. Anyagmodellek definiálása .....	23
5.2.2.1. Beton.....	23
5.2.2.2. Feszítőpászma.....	27
5.2.2.3. Acéllap.....	28
5.2.3. Terhek, megtámasztások, monitorpontok.....	28
5.2.4. Alkalmazott végeelem.....	30
6. NUMERIKUS VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK.....	31
6.1. Megtámasztás hatása.....	31
6.2. Felső pászma hatása .....	32
6.3. Elforduló és fix repedésterjedési modellek.....	34

---

6.4. Numerikus és valós kísérleti eredmények.....	35
7. ÖSSZEFOGLALÁS.....	39
8. KONKLÚZIÓ .....	39
9. FELADAT NEHÉZSÉGEI .....	40
10. TOVÁBBI KUTATÁSI LEHETŐSÉGEK.....	41
11. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	42
12. FELHASZNÁLT IRODALOM .....	43
13. MELLÉKLETEK.....	45
13.1. [A]	
13.2. [B]	

## 1. ELŐREGYÁRTÁS

### 1.1. Bevezetés

A mai fejlődő világ folyamatosan növekvő igényeinek kielégítése korántsem egy egyszerű feladat. Ez a probléma az élet minden területén jelentkezik, így az építőipart sem kerülhette el. Számos alkalmazott anyag közül az egyik legelterjedtebb és legközkedveltebb a beton. A beton több évtizedes múlttal rendelkezik, de hazánkban jellemzően a II. világháborút követően terjedt el. A háborút követően Magyarország romokban állt, ezért olyan megoldást kellett találni, ami lehetővé teszi a gyors építkezést. Az előregyártás történhet az építkezés helyén vagy üzemi körülmények között. Ez a technológiai megoldás az évek alatt számos fejlődésen esett át, így napjainkban több területen is alkalmazzák:

- Magasépítés,
- Mélyépítés,
- Hídépítés,
- Útépítés,
- Közműépítés.

Magasépítési területen egyaránt gyártanak függőleges és vízszintes teherviselő elemeket is. Lehetőség van a számos magyarországi gyártó termékei közül kiválasztani a számunkra megfelelőt. Egy magasépítési szerkezet, például egy csarnok esetén előregyártással készítik el a kehelyalapokat, melyekbe a függőleges teherviselő elemeket, az oszlopokat helyezik el. A kettő elem kapcsolatának kialakításához minimális monolit betonra van szükség. Az oszlopokat hosszirányban a peremtartók kötik össze, míg keresztirányban a főtartók (hosszú főtartós kialakítás). Természetesen ezek is előregyártott elemek. Ma már nem elképzelhetetlen, hogy az előbb említett főtartókkal, akár 20-30 méter feletti fesztávokat is áthidaljanak.

Korábban a héjaláshoz T, valamint TT keresztmetszetű betonelemeket (1. ábra) alkalmaztak, de ez ma már nem jellemző. A legelterjedtebb megoldások közé tartozik a szendvicspanel, vagy a magasbordás trapézlemez és az ehhez tartozó megfelelő rétegrend.



1. ábra: TT keresztmetszetű elem [2]

Egy csarnok jellemzően közbenső, de akár záró szintjének egy lehetséges kialakítása megoldható körüreges födempallóval. A tervezőmérnök által kiszámolt igénybevételekre a megfelelő teherbírású födempalló egyszerűen kiválasztható a gyártók által kínált katalógusból. Különböző kialakítású, keresztmetszetű, hosszúságú pallók közül lehet kiválasztani az optimális elemet. Magyarországon az alábbi gyártók forgalmazzák az előbb említett elemet:

- Ferrobeton,
- Leier,
- SW- Umwelttechnik.

A TDK szakdolgozatomban szeretném részletesebben is bemutatni ezeket az elemeket, mert kevés szakirodalmi adat található ezeknek az elemeknek a numerikus modellezéséről. Egy valós kísérletből származó eredmény lehetőséget biztosít számomra, hogy a numerikus modellezésből kapott eredményeket validáljam. Egy pontos modell, ami a valóságot le tudja írni, kiválthatja a valós kísérleteket. Ezzel időt és pénzt lehet megspórolni, illetve nagyszámban lehet végrehajtani a numerikus vizsgálatokat. A megfelelő modellekkel, modellezési eljárások megalkotásával más-más kialakítású/keresztmetszetű, akár nem szabályos elemeket is meg lehet vizsgálni.

## 1.2. *Előregyártás előnyei [1]*

Minden anyag esetén (beton, acél, fa) beszélhetünk az előregyártás előnyeiről és hátrányairól. Vasbeton szerkezetek esetén a nem megfelelő kivitelezésre számos példát lehetne bemutatni. Nem sikerült a beton bedolgozása, rosszak voltak az időjárési körülmények, a beton összetételét nem tudták ellenőrizni. Ezekre mind megoldást jelent az előregyártás, azon belül is az üzemi körülmények között végrehajtott előregyártás (nem a helyszíni). Az ilyen technológiával készült szerkezeti elemekre jellemző, hogy magas szilárdságú anyagokat alkalmaznak, valamint számos elem esetén feszítést is (főtartó, födempalló). Üzemi körülmények között a beton nyomószilárdsága akár a  $60-120\text{N/mm}^2$ -t is elérheti, ezt nevezzük nagy szilárdságú betonnak. Monolit szerkezet esetén ilyen magas szilárdságot elérni rendkívül költséges és bonyolult. A technológia napjainkban egy olyan szintet ért el, hogy a nagy szilárdságú beton felett is még található különböző betonok.  $120-250\text{N/mm}^2$  közötti nyomószilárdsággal rendelkeznek az ultranagyszilárdságú betonok és  $400\text{N/mm}^2$  felett pedig már a hiperszilárdságú betonokról beszélhetünk. A megnövekedett szilárdsággal együtt jár a keresztmetszeti méretek csökkentése, vagyis karcsúbb szerkezeteket tudunk előállítani. Üzemi körülmények között könnyebb és egyszerűbb az elemek vizsgálata, a szilárdság ellenőrzése, tehát garantálni tudják, hogy a szerkezeti elemek rendelkeznek az előírt szilárdsági tulajdonságokkal. Egy monolit szerkezet építéséhez zsaluelemeket, állványokat használnak, valamint nagy az élőmunka igénye. Az előregyártott elemekből készült szerkezethez kevesebb zsaluelemet kell használni és az élőmunka igénye is lényegesen kisebb, emellett jól gépesíthető és tipizálható. A korábbiakban már említettem, hogy az időjárás egy fontos tényező egy építkezés során. Az időjárási viszonyok az üzemi előregyártást nem befolyásolják, ezért az év minden szakaszában akadálytalanul folytathatók a munkálatok.

## 1.3. *Előregyártás hátrányai [1]*

Az előregyártott, nagy fesztávú szerkezeti elemeket az üzemből el kell szállítani az építkezés helyszínére. Egy acél rácsostartó szerkezetet akár több darabban is el lehet szállítani és a szükséges csomópontokat a helyszínen ki lehet alakítani. Ezzel szemben egy 20-30 méteres feszített vasbeton főtartót nem lehet „felszabdalni” és több darabban szállítani, mert erre nincs lehetőség. Az ilyen elemeket egészben kell eljuttatni az építkezésre, ami korántsem egy egyszerű feladat. Egy adott méret elérése után útvonaltervre és engedélyre van szükség.



A szállításhoz speciális járműre van szükség és az elem elhelyezéséhez darura (ez lehet autódaru, toronydaru, ami éppen adott építkezésen található). A tökéletes szerelés platóról történik, azaz az adott elemet leemelve a szállítójárműről azonnal a végleges helyére kerül. Abban az esetben, ha ez nem lehetséges, akkor deponálni kell, vagyis helyet kell biztosítani az elemeknek, addig amíg nem kerülnek beépítésre.

Az előregyártott elemek kapcsolatainak kialakítása nehezkesebb, minősége alulmarad a monolit technológiával készült kapcsolatokéhoz képest. Az elemeknek pontosan kell illeszkedniük, ezért szigorúan ellenőrzik a méreteket a megadott mérettűrési előírások alapján.

A tervezés során körültekintően kell megtervezni a kapcsolatokat.

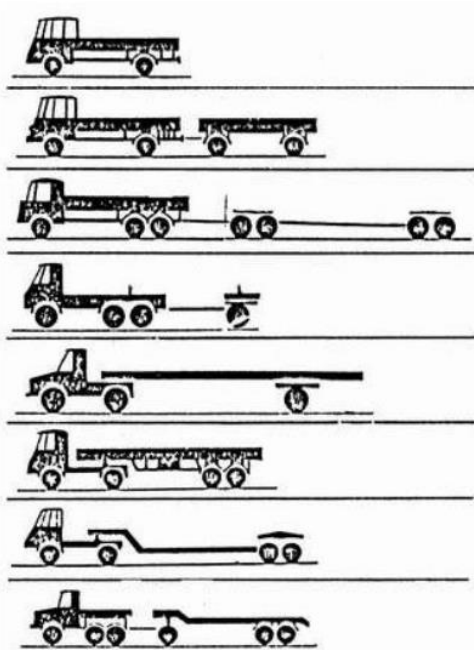
## *1.4. Körüreges födempallók*

### *1.4.1. Szállítási lehetőségek [3]*

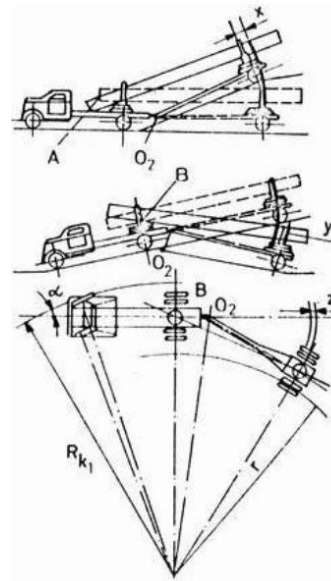
Az 1.3 pontban ismertetett előregyártás hátrányai közül kiemeltem a nagy elemek szállítási problémáit. Az üzemben történő előregyártást és a helyszíni szerelési tevékenységeket a szállítási folyamat köti össze, hiszen ez a kettő eltérő időpontban és eltérő helyen történik. Kisebb elemek esetén ez a folyamat lényegesen egyszerűbb, mert a nagy elemekhez speciális szállítójárműre van szükség. A szállítási lehetőségek közül négyet lehet kiemelni:

- Közút,
- Vasút,
- Vízi,
- Levegő.

A levegőben történő szállítást akkor szokták alkalmazni, ha az adott építkezési terület nehezen megközelíthető, így ez hazánkban nem jellemző. A vízi szállítást hidak építésénél, szerelésénél vagy kikötők építésénél alkalmazzák, így ez sem egy elterjedt megoldás. A vasút jó megoldásnak tűnhet, hiszen nagy mennyiségeket képes elszállítani, de elenyésző annak az esélye, hogy az üzem területéhez, valamint az építkezéshez közel található vasúti sín. Egyetlen logikus megoldás maradt, a közúti szállítás. A szállítójármű megválasztásánál figyelembe kell venni az elem méretét, a súlyát, az adott szállítási körülményeket, útviszonyokat és a jármű teherbírását. Továbbá kiemelném, hogy biztosítani kell az elemek sérülésmentes szállítását és a közúti forgalom veszélyeztetésének elkerülését. Ezek alapján számos jármű áll rendelkezésre, amelyek közül néhány megfigyelhető a 2.ábrán.



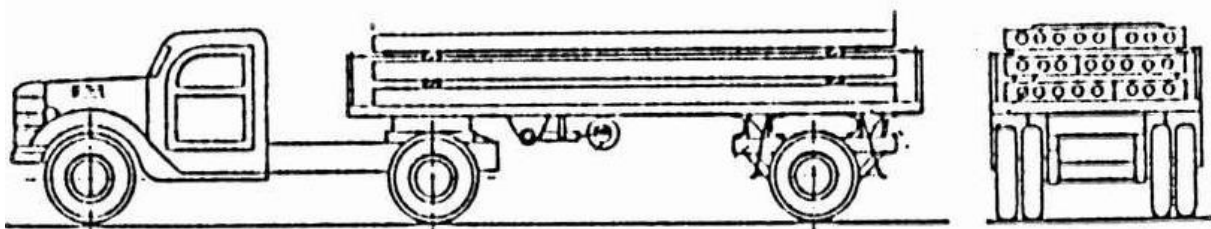
2. ábra: Szállítójárművek [3]



3. ábra: Szállítójárművek [3]

A hosszú elemeknél az úgynevezett forgószámolyt használják és ebben az esetben nagy odafigyelést igényel az útvonal kiválasztása. Az elem egyik vége a jármű elejéhez közel fekszik fel a forgószámolyon (*B pont*), a másik vége a pótkocsi legvégén. Az elemek elfordulnak az utánfutóval, de nem azonos középpont körül. Az alátámasztási pontok elmozdulhatnak és ennek következtében az elemek megsérülhetnek.

A pallókat kialakításuktól és méretüktől függetlenül mindig vízszintes helyzetben kell szállítani (*4. ábra*). A legalsó elemek nem közvetlenül a platóra fekszenek fel. Az elválasztás biztosítása fabetétekkel történik. Több tényezőt szem előtt tartva, egy lehetséges megoldás lehet, az elemek több sorban való elhelyezése. Fontos, hogy az elemek, mint a plató esetén, ne érintkezzenek közvetlenül, hanem fabetétekkel legyenek elválasztva.



4. ábra: Pallók szállítása [3]

Kisebb elemek szállítása esetén (5. ábra) elegendő egy hagyományos nyergesvontató, nincs szükség a forgószámlóra. Ha a biztonság garantált, akkor egy sorban több elem is elhelyezhető.



5. ábra: Pallók elhelyezése [3]

#### 1.4.2. Emelési lehetőségek [3]

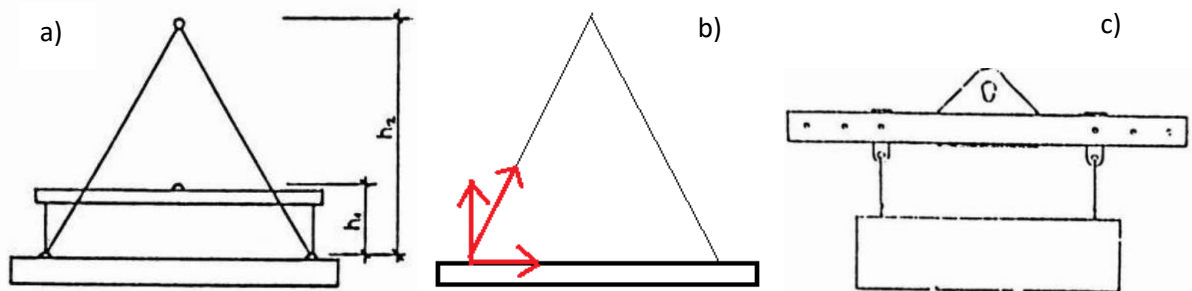
A különböző szerkezeti elemeket eltérő módon lehet megemelni és mozgatni. Elsődleges szempont a biztonság és a sérülésmentes emelés. A művelet az úgynevezett emelési segédszerkezettel hajtható végre.

*Emelési segédszerkezet:* Olyan kiegészítő szerkezeti elemek gyűjtőneve, amelyek az elemek megfogását, forgatását biztosítják. Képesek felvenni az emeléskor keletkező többletigénybevételeket.

A segédszerkezettel szemben támasztott követelmények:

- A keletkező igénybevételek felvételére alkalmas és kielégíti a szilárdsági feltételeket.
- Emeléskor a szerkezeti elem nem kerül instabil helyzetbe.
- A kereskedelmi forgalomban kapható anyagokból előállítható. Kerülni kell az egyedileg gyártott elemeket.
- A fel-, és leszerelés könnyen és gyorsan végrehajtható legyen.
- Kerülni kell a nagy szerkezeti magasságot.
- Sérülésre és szennyeződésre kevésbé érzékeny.

A körüreges födempallók esetenként meghaladhatják a 10-20 méteres hosszt is. Kötélhimbával történő emelés esetén a szerkezeti magasság elfogadhatatlan mértékű lenne (6. ábra). Az ilyen helyzetek kiküszöbölésére gerenda himbát kell használni. Továbbá probléma, hogy a ferde kötél miatt vízszintes normálerő is keletkezik, ami a tartót fogja terhelni (6/b ábra). Ehhez hasonló hibás emelés a tartó törését vagy megrepedését vonja maga után.



6. ábra: Födempalló emelése [3]

a) Szerkezeti magasság, b) Vízszintes normálerő, c) Gerenda himba

A födemelemek egyes típusai lapszerű kialakításúak, kis szerkezeti magassággal rendelkeznek. A vízszintes helyzetben történő emelés miatt érzékenyek a stabilitásvesztésre, ezért több ponton kell megfogni őket (hárompontos megfogás, négyponos megfogás). A körüreges födempallókat speciális megfogó eszközzel, ollós megfogóval (7. ábra) lehet megemelni, ezért külön nem kell megfogási pontot kialakítani a szerkezeti elemen.



7. ábra: Villás megfogó [3]

Az ollós „pofa” a pallót a két oldalán és a két végén, összesen négy ponton fogja meg. A villás megfogó a gerenda himbához láncokkal van erősítve, biztosítva a kis szerkezeti magasságot. A 7. ábrán látható, hogy egy hosszú gerenda esetén több helyre is rögzíteni lehet az ollós megfogót.

### 1.4.3. Deponálási lehetőségek [3]

Az optimális szerelés platóról történik, ennek hiányában deponálni kell az elemeket. Az ütemterv szerinti építkezés rendkívül nehéz, mert nagyon sok tényező miatt alakulhatnak ki késések, csúszások. Egy esetleges szállítójármű késés, vagy annak meghibásodása fennakadásokat okozhat a szerelésnél. Ezek kiküszöbölésére tartalék elemeket lehet tartani az építkezésen, így a munka akadálytalanul folyhat tovább. A pallók deponálására ugyanazok a szabályok érvényesek, mint amiket a szállításkor ismerttettem. Közvetlenül nem lehet a földre helyezni őket, hanem fa alátételeket kell lefektetni a földre és csak ezekre szabad elhelyezni. A pallókat egymástól szintén fabetétekkel kell elválasztani, de ez lehetőséget biztosít, hogy több sorban helyezték el őket. (8. ábra).



8. ábra: Pallók deponálása [3]

### 1.4.4. Szokványos beépítés

#### 1.4.4.1. Általános ismertetés

A Ferrobeton Zrt., Leier, SW - Umwelttechnik Magyarország legnagyobb előregyártó vállalatai, amelyek több évtizedes múlttal és tapasztalattal rendelkeznek. Számos különböző elemet gyártanak, többet között oszlopokat, födemelemeket, födépallókat, gerendákat, hídelemeket stb. Az általuk forgalmazott termékek közül részletesebben szeretném bemutatni az előfeszített körüreges födépallókat. A különböző elemekre vonatkozó általános adatokat az 1. és 2. táblázat tartalmazza.

		FF	SF
A födémpanelek betonminősége (min)		C50/60	C40/50
Alkalmazott feszítőbetétek		Y1860S7-9,3 Y1860S7-12,5	Y1770C-5,0
Feszítő feszültség [N/mm <sup>2</sup> ]	Alsó sorban	1000	1100
	Felső sorban	500	1100

1. táblázat: Általános adatok [4]

Rendeltetés	Előregyártott vasbeton üreges födempalló	
Gyártóüzem	Jánossomorja	
Méret	Vastagság [cm]	16, 20, 26.5, 32, 40, 45, 50
	Szélesség [cm]	119.5 és 120
	Hosszúság [m]	3.50 - 23.50
Anyagminőségek	Feszítőbetét szakítószilárdsága [Nmm <sup>2</sup> ]	≥1770
	Beton minősége	LÜF 16, LÜF 20 esetén: C40/50 LÜF 26.5, LÜF 32, LÜF 40, LÜF 45, LÜF 50 esetén: C50/60
Tűzállóság	Tűzvédelmi osztály	A1
	Tűzállósági határérték	REI 90

2. táblázat: Általános adatok [6]

A táblázatokból egyértelműen látható, hogy a beton és a feszítőelemek is nagyszilárdságú anyagok. A feszítés révén egy sajátfeszültségi állapot jön létre, amely a betonban meghatározott irányban nyomófeszültséget, a feszítőelemben pedig húzófeszültséget jelent. A beton alacsony húzószilárdságához tartozó hátrányokat ezáltal mérsékelni lehet, valamint a magas szilárdságú feszítőelemek szilárdsága jelentősebben kihasználható. [5]

A födempallók felhasználási területe rendkívül változatos. Egyaránt alkalmazzák iroda, ipari és családi házak építéséhez.

Az elemek a csavarsajtolás miatt már 28 napos kor előtt elérik a C50 szilárdságot. A magas szilárdság miatt vékonyabb és hosszabb födempallók gyártása lehetséges, de emellett kellő teherbírással is rendelkeznek. A födempallók kéttámaszú tartóként, egyirányban teherviselő lemezszerkezetként alkalmazandók, mind közbenső födém, mind tetőfödém esetén.

A katalógusból kiválasztott, teljes, azaz nem vágott elem teherbírása minden esetben garantált. Vágott, lyukasztott födemelemek teherbírása eltérő lehet.

Egy adott elem (például FF- 200 jelű körüreges födempalló) különböző változatokban kérhető. Az egyes változatokhoz eltérő számú és átmérőjű feszítőpászma tartozik, melyeknek a növelésével nagyobb teherbírás érhető el.

A beépítési szabályok betartása fontos, annak érdekében, hogy az elemekre vonatkozó teherbírás garantált legyen, valamint az élettartamuk alatt ne károsodjanak és kielégítsék a használati határállapotokat.

A legfontosabb beépítési szabályok a következők: [4]

- A födempallók olyan szerkezeti elemekre fektethetők, amelyek kellő teherbírással rendelkeznek és együtt tudnak dolgozni a pallókkal.
- A felfekvés értéke  $L/100$ , de minimum 10cm.

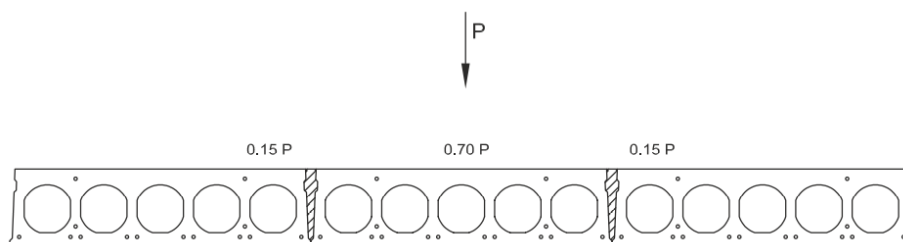
- A fogadószerkezet felülete sík legyen.
- A statikailag helyes felfekvés („puha” felfekvés) biztosítása HF30-as habarccsal, vagy neoprén sarúval. [4]

#### 1.4.4.2. Keresztirányú együttdolgozás [4]

Bizonyos megfontolások mellett figyelembe lehet venni a keresztirányú együttdolgozást. A plakkok közötti hézagokat minimum C20/25 betonfugával kell kitölteni (A betonszükségletet az [A] és [B] melléklet tartalmazza). Részletes számítások hiányában egy adott  $P$  erő 15-70-15 arányban oszlik meg három szomszédos plakk között (9.ábra). Az egyenletes tehereloszlás miatt azonos elemeket kell egymás mellé fektetni. Amennyiben a terhelés egyenlőtlenül oszlik meg a födémen, akkor felbetont kell alkalmazni Ezt minden esetben a statikus tervező írja elő, de a minimális követelmények a felbetonra: [7]

- Minimális vastagság 5 cm,
- Beton szilárdsági jele min. C20/25.

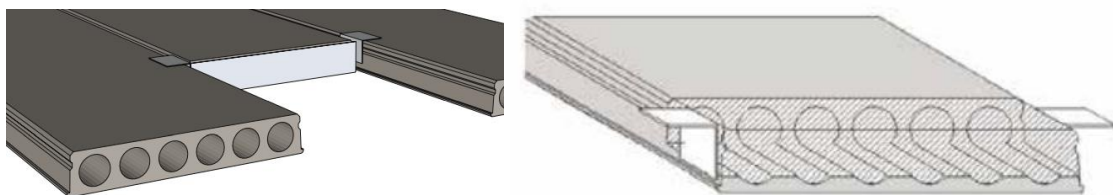
A keresztirányú teherviselés részletesebb számítása megtalálható az EN 1168 C melléklet C4 pontjában, vagy a FIB Bulletins-ben. [20]



9.ábra: Keresztirányú együttdolgozás [4]

#### 1.4.4.3. Áttörések kialakítása

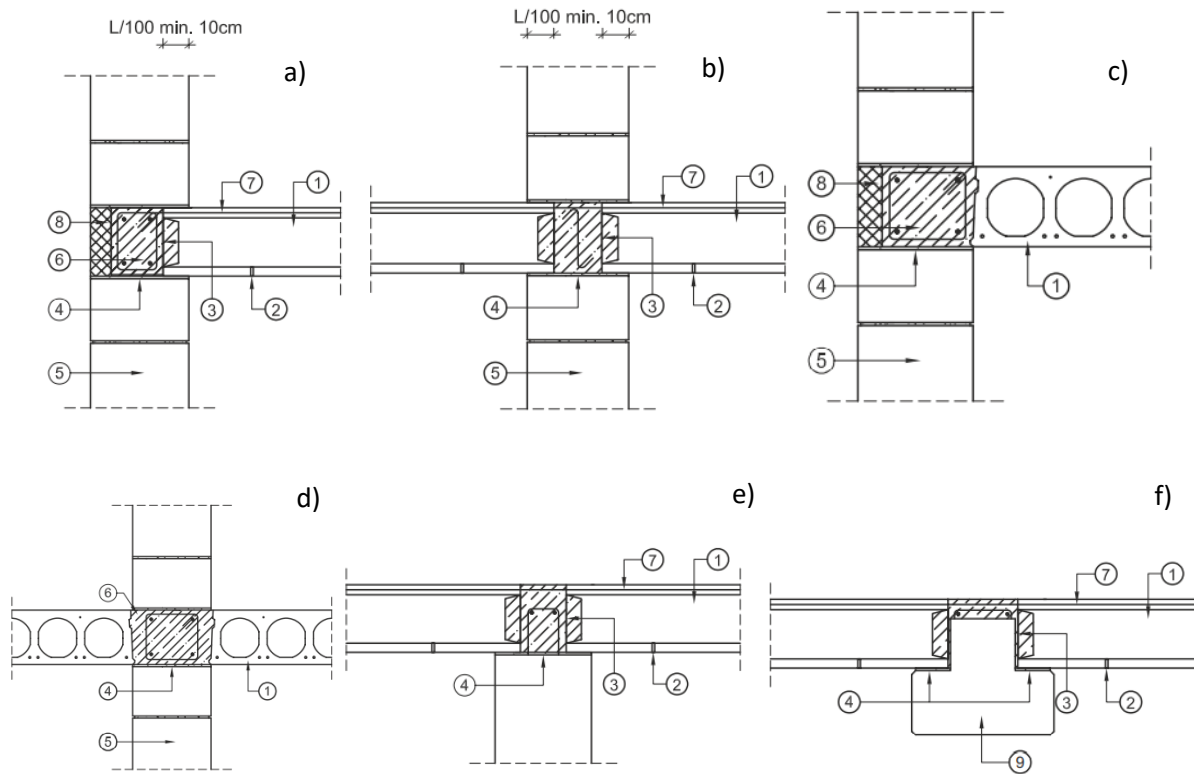
Az áttörések kialakítása acélkeretes kiváltással történik (10.ábra). A nem teljes hosszúságú elem „acélfülekkel” támaszkodik fel a mellette elhelyezkedő két teljes hosszúságú elemre. Az acélkeretnek ki kell elégítenie a tűzállósági követelményeket. [6]



10. ábra: Acélkeretes kiváltás [6]

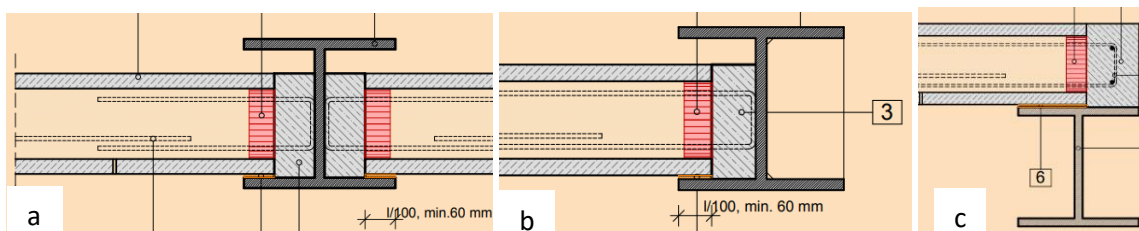
#### 1.4.4.4. Jellemző csomóponti kialakítások

A tervezési útmutatókban különböző csomóponti kialakítások, megoldások találhatók az előregyártott elemekhez. (11. ábra). Ezek az ajánlások, megoldások nagy segítséget nyújtanak a tervezési fázisban.



11. ábra: Csomóponti kialakítások [4]

- a) Koszorú kialakítás - oldalnézet, b) Közbenső csomópont – oldalnézet, c) Koszorú kialakítása – szemből nézet,  
d) Közbenső csomópont – szemből nézet, e) Felfekvés négyzet keresztmetszetű gerendára,  
f) Felfekvés T keresztmetszetű gerendára



12. ábra: Acélgernda és vasbeton körüreges földémpalló kapcsolata [6]

- a) Kétoldali földémpalló feltámaszkodás, b) Egy oldali földémpalló feltámaszkodás,  
c) Palló feltámaszkodása az acél gerenda tetején



A födépallók elhelyezhetők falazott szerkezeteken (11/a, b, c, d), előregyártott vasbeton szerkezeteken (11/e, f), vagy acél gerendán (12. ábra) A kapcsolatok kialakítása vasalt koszorúval történik, amelyet a statikus tervezőnek kell megterveznie. A javasolt bekötővasakat a 3. táblázat tartalmazza.

Fesztáv [m]	Betonacél átmérője [mm]
0-6	8
6-9	10
9-	12

3. táblázat: Ajánlott bekötővasak [4]

A pallók végén található műanyag üregzáró megakadályozza a monolit beton bejutását az üregekbe. Nem megfelelő zárás esetén egy csapadékos nap után víz kerülhet az üregekbe. Ekkor víztelenítő furatokat kell kialakítani a palló két végén.

Minden esetben a födépalló neoprén sarura fekszik fel, amely biztosítja a rugalmas felfekvést. Az acél gerenda gerincénél (12/a, b) helyszíni kibetonozást készítenek. Két palló közötti fugába vasalást helyeznek el, amit bekötnek a gerenda gerincéhez. A bekötéshez „U” alakú vasalatot alkalmaznak.

#### 1.4.4.5. Helyszíni betonozás [6]

A betonozás előtt ellenőrizni kell a pallók illeszkedését, a közöttük lévő hézagokat, a műanyag üregzárók meglétét, a koszorúk vasalását. Az alkalmazott beton minőségét a statikus tervező határozza meg. A betonozás előtt elő kell nedvesíteni a felületeket. A hézagokat és a koszorút egy ütemben kell betonozni és biztosítani kell a megfelelő betontakarást.

Az alkalmazott modern technológiának köszönhetően a pallók felülete egyenletes és sima, ezért nem igényelnek vakolatot. Egy glettréteg felhordása után már festhető.



13.ábra: Betonozás előtti ellenőrzés [6]

## 2. SZAKIRODALMI KUTATÁS

A vasbeton szerkezetek numerikus és laboratóriumi vizsgálatáról számos korábbi tanulmány és cikk jelent meg, amelyek részletesen bemutatják a vizsgált területeket.

Az [1] -ben többek között az előregyártott vasbeton oszlop, kehelyalap és a kitöltő monolit beton kapcsolatáról, valamint a gerenda-oszlop kapcsolatáról olvashatunk. Az általuk fejlesztett numerikus modellekből kapott eredményekből általános érvényű megállapításokat tettek a kitöltő beton szilárdságára, rugalmassági modulusára, az előregyártott szerkezeteknél alkalmazott betonacél tüskékre.

Másik kutatási anyagban, a [13] -ban Roszevák Zsolt a vasbeton szerkezetű épület viselkedését vizsgálja különböző numerikus modellekkel. Axis VM és ATENA szoftverek segítségével vizsgálja meg a monolit vasbeton oszlop-födém, valamint fal-födém kapcsolatokat. Bemutatja az egyes numerikus modellezési lehetőségekben rejlő lehetőségeket és korlátokat.

A [21] az előfeszített vasbeton körüreges födempallók hajlítási és nyírési vizsgálatáról szól. Részletes valós kísérletet hajtottak végre, amely során detektálták az eltolódásokat és az erőket, valamint a vizsgálták a repedéseket. Numerikus modellt fejlesztettek, amit megfeleltettek a valós kísérlettel.

A [22] -ben numerikus modelleken keresztül vizsgálták az előfeszített körüreges pallókat hajlításra, de magasabb hőmérsékleten. A hőmérséklet hajlításra gyakorolt hatásának kimutatása volt a cél.

A [23] -ban szintén érdekes tanulmány található az előfeszített körüreges födempallók és az acélgerendák kapcsolatáról. A pallók egy acél I gerendára fekszenek fel és a kapcsolatot nyírt csapokkal alakították ki, valamint a pallók kaptak még egy felbeton réteget. Numerikus modelleken keresztül vizsgálták meg az egyes elemeket és az egymásra gyakorolt hatásukat. A vizsgálat során mérték a nyíróerőket, a hajlítónyomatékokat, valamint az eltolódásokat. Különböző átmérőjű nyírt csapokat alkalmaztak és ezeknek a hatását is elemezték. Az egyes szerkezeti elemeket külön-külön és az egymásra gyakorolt hatás kimutatásának érdekében együtt is vizsgálták.

A [1] [14] [15] [16] [19] kutatási eredmények alapján tudtam a numerikus modellezés során az egyes anyagmodelleket definiálni, mind betonra, feszítópásmára és az acéllapra.

A hétköznapi életben praktizáló mérnökök körében alkalmazott végeeselemes szoftverek a feszítés hatását nem képesek megfelelően kezelni, ezért szükség volt egy olyan nem hétköznapi szoftverre amelyik erre képes.

### 3. KUTATÁS CÉLJA

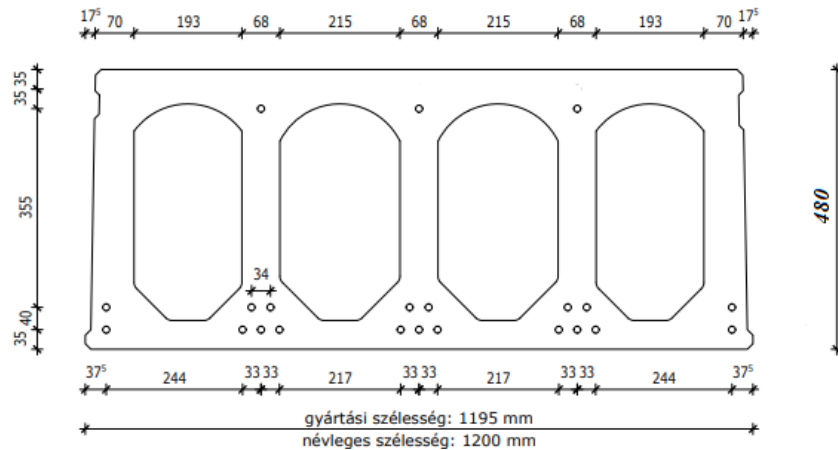
A 2. pontban bemutatott tanulmányok és cikkek csak a lágy vasalású szerkezetek területét fedik le, ezzel szemben nagyon kevés tanulmány található a feszített szerkezetek valós és numerikus vizsgálatáról. Fő célom az, hogy numerikus modellek segítségével megvizsgáljam a különböző keresztmetszetű, vasalású és hosszúságú előregyártott feszített pallókat alapvetően hajlításra. További cél, hogy a fejlesztett numerikus modell a feszítés hatását is képes legyen kezelni és így a teljes feszítési folyamat nyomon követhető legyen. A feszítési folyamat során egy saját feszültségi állapot jön létre a szerkezeti elemekben a beton és a feszítőpászma között. A beton és a feszítőpászma egymásra gyakorolt hatásának vizsgálata egy további cél. Az egyes anyagokra (beton, feszítőpászma, acéllap) vonatkozó anyagmodellek helyes felvétele, annak érdekében, hogy a numerikus modell képes legyen leírni a valóságot. Nagy mérföldkőnek számít, ha a numerikus modellezésből kapott eredmény megegyezik a valós kísérletből származó eredménnyel. Ez elengedhetetlen célja a vizsgálatnak.

A végrehajtott numerikus kísérletek és ezekből származó eredmények ösztönözhetik a hazai gyártókat, hogy több laboratóriumi vizsgálatot hajtsanak végre. Kellően sok valós kísérleti eredménnyel a numerikus modellek továbbfejleszthetők és még nagyobb pontossággal képesek leírni a valóságot. Ebben az esetben a laboratóriumi vizsgálatok már helyettesíthetők lesznek a numerikus vizsgálatokkal.

Összefoglalva az elmondottakat, elsődleges cél, hogy az előregyártott feszített vasbeton körüreges pallókra egy numerikus modellezési eljárást fejlesszek ki hajlításra. A vizsgálat alapját egy valós kísérleti eredmény adja, így a numerikus eredmények megfeleltethetők.

#### 4. KÍSÉRLETI ÉS TERHELÉSI ELRENDEZÉS

Jelen tanulmány alapját a Ferrobeton Zrt. által készített és az üzem területén próbaterhelt FF500 jelű, 17,8 méter hosszú előfeszített körüreges földémpalló próbaterhelési kísérleti eredménye adta. A 14. ábrán látható, az egyedi FF500 jelű palló keresztmetszeti kialakítása.



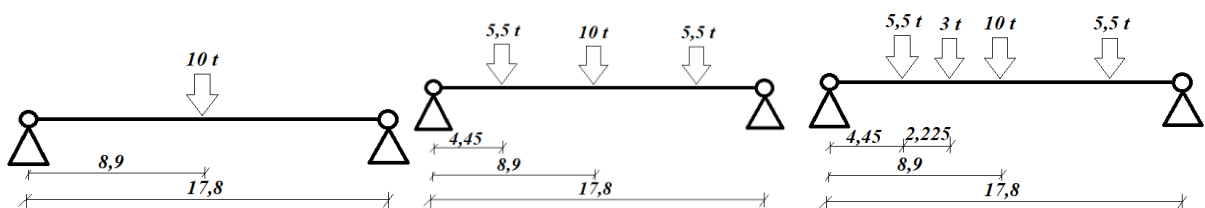
14. ábra: Egyedi FF500 jelű palló keresztmetszeti kialakítása [8]

A standard FF500 jelű palló keresztmetszeti magasságát, 500 mm-t lecsökkentették 480 mm-re. A standard „F” jelű vasalás esetén az alsó sorban 19 db Y1860-12,5-F1-C1, míg a felső sorban 6 db Y1860-9,3-F1-C1 pászmát helyeznek el. Az „F” jelű vasalás egy módosított változata került bele a vizsgált pallóba. A felső sorban nem hat darab pászmát alkalmaztak, csupán három darabot. [8]

A kísérlet három terhelési lépcsőre osztható fel és az egyes terhelési esetekhez tartozó eltolódásokat rögzítették. Az első lépcsőben a tartó közepére egy 10 tonnás terhet helyeztek el. Ahogy a 15. ábrán is látható, a 10 tonnás teher a második terhelési lépcsőben kiegészült további kettő 5500 kg-os teherrel. A kettő 5500 kg-os teher helyzete, a tartó negyedelőpontjaiban volt. Az utolsó terhelési lépcsőben további 3000 kg (15. ábra) terhet helyeztek el a tartón, a 10 tonnás teher mellett (16. ábra). [8]

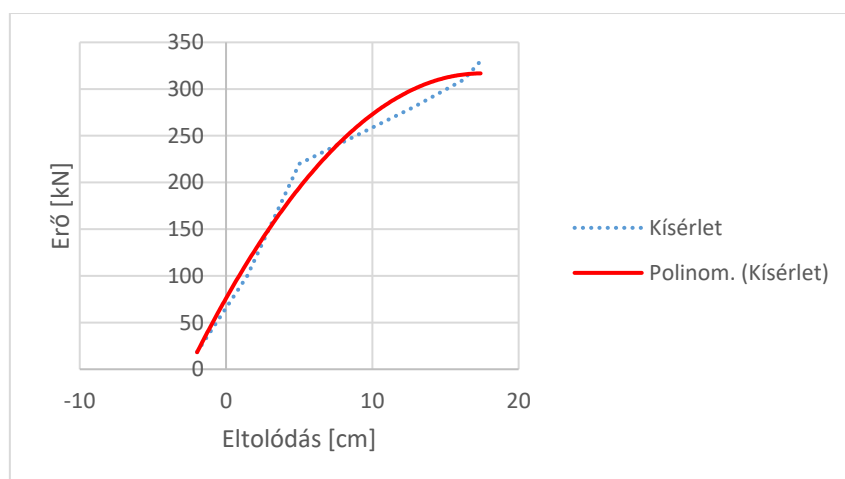


15. ábra: Kísérleti teherelrendezés [8]



16. ábra: Teherelrendezés

A terhelési lépcsőkben detektálták a függőleges eltolódást a tartó közepén, tehát a diszkrét erő-eltolódás pontpárokból vált szerkeszthetővé a kísérlethez tartozó folytonos erő-eltolódás diagram. Mivel csak a terhelési lépcső végén mérték az eltolódást és a terhelés folyamata közben nem, ezért a rendelkezésre álló kevés adat miatt szükségessé vált néhány virtuális pontpár definiálása. A diszkrét pontokra matematikai függvényillesztéssel egy folytonos függvényt illeszttem, melynek eredménye a 17.ábrán látható.



17. ábra: Valós kísérletből származó erő-eltolódás diagram

A szaggatott kék vonal egy lineáris szakaszból álló függvény, ezzel szemben a piros görbe egy magasabb rendű polinom. A piros görbe esetén polinomiális függvényt alkalmaztam, melynek a fokszáma 2.

A kísérlet során csak egy adott terhelésre vonatkozó megfelelést szerettem volna igazolni, ezért nem terhelték tönkremenetelig. Emiatt a tartó tényleges teherbírásáról, az ehhez tartozó maximális eltolódásról és maximális terhelési erőről nem áll rendelkezésre adat. A függvényillesztés után egy probléma merült fel, miszerint a görbe eltolódási értékei mind pozitív értékűek, holott egy feszített szerkezet felpúposodik, tehát negatív értelemben vett eltolódást szenved. Tehát a görbe kezdeti szakaszán még a negatív oldalon kell, hogy legyen és egy adott teherszint elérése után tér át a pozitív oldalra. A feszítéshez tartozó függőleges eltolódásról nem áll rendelkezésre adat, ezért a numerikus modelltől kapott értékkel eltoltuk annak érdekében, hogy a kettő eredmény összehasonlítható legyen.

## 5. NUMERIKUS MODELL

### 5.1. Alkalmazott szoftver [9]

A numerikus modell megalkotása a Červenka Consulting által forgalmazott ATENA - GID környezetben valósult meg, a modell futtatása pedig az ATENA Studioban. A GID egy felhasználóbarát, CAD-hez hasonló rajzfelülettel rendelkező, fejlett anyagmodellek definiálását lehetővé tevő szoftver. Az ATENA Studio főleg beton és vasbeton szerkezetek nemlineáris vizsgálatára szolgál, mely figyelembe veszi a fejlett törésmechanikai elméleteket. A szoftverben definiált, úgynevezett monitorpontok, amelyek detektálják az adott eltolódásokat, illetve erőket, lehetőséget biztosítanak, hogy a numerikus modell futtatása közben egy valós kísérlethez hasonló erő-eltolódás diagramot ábrázoljunk.

Az összetett anyagmodellek, a 3D végelemek és a fejlett törésmechanikai elméletek révén a valós viselkedés nagy pontossággal modellezhető. Továbbá a nemlineáris futtatás során nyomon követhető a repedések kialakulás és azok irányultsága.

Az anyagmodellek különböző folyási feltételeken, elméleteken alapulnak, melyeknek a részletesebb magyarázata a [9] -ben található.

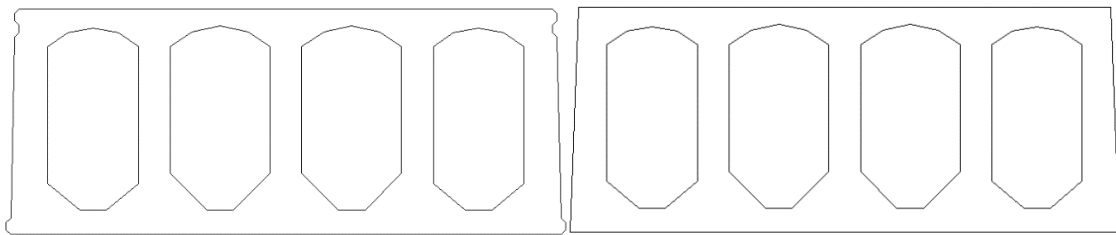
A numerikus modellhez tartozó eredmények valós kísérleti eredményekkel történő megfeleltetése az anyagmodellek egyedi parametrizálásával lehetséges.

## 5.2. Modell felépítése

### 5.2.1. Geometriai kialakítása

Habár a GID felhasználóbarát rajzfelülettel rendelkezik, egy körüreges födempalló keresztmetszeti kialakítása túlságosan bonyolult ahhoz, hogy ebben a környezetben valósuljon meg. Segítségül hívtam a Nemetschek Allplan szoftvert, amelyben a keresztmetszetet könnyedén meg tudtam rajzolni, majd DXF fájlformátumként be tudtam importálni GID-be.

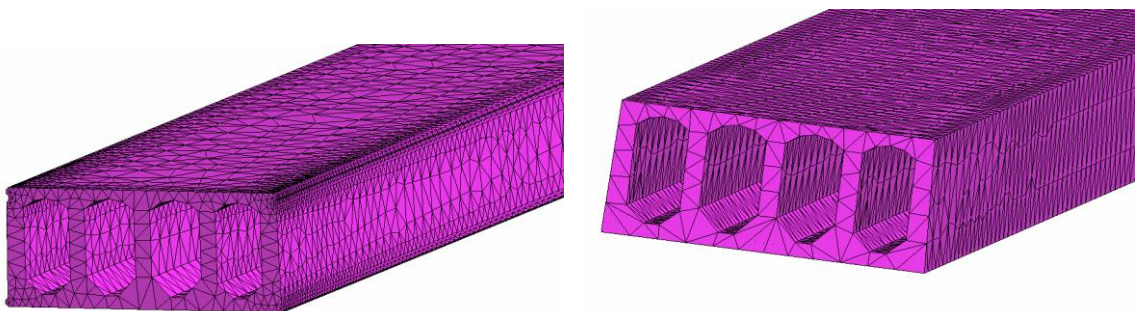
A vizsgált FF500 palló keresztmetszetén egyszerűsítést hajtottam végre. (18. ábra). A bordázott oldalfalat egyenes oldalfallal helyettesítettem, annak érdekében, hogy csökkentsem a végelemek számát, ezáltal a futtatási időt.



18. ábra: Keresztmetszet módosítása

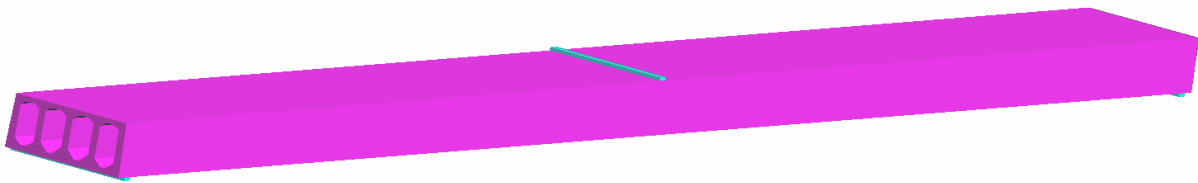
a) Eredeti keresztmetszet, b) Módosított keresztmetszet

A palló vizsgálata alapvetően a hajlításból származó igénybevételekre koncentrálódik és a bordák az ehhez tartozó hajlítási ellenállást nem, vagy csak oly kis mértékben befolyásolják, amik már elhanyagolhatók. Továbbá azonos hálózás esetén a végelemek száma a harmadára csökken le. (19. ábra).



19. ábra: Végelemek száma

A numerikus modell geometriája (kivéve az egyszerűsített keresztmetszetet) és a statikai váz a kísérleti elrendezéssel megegyező. A feszítópázmák száma, helyzete a gyártói adatoknak megfelelően lett modellezve. Annak érdekében, hogy az erőbevezetés közvetlen környezetében ne alakuljon ki szingularitás, szükségessé vált teherelosztó acéllapok definiálása. Ehhez hasonló acéllapok szükségesek a támaszok definiálásához. A palló és az acéllapok 3D térfogatelemként lettek definiálva, a feszítópázmák pedig 1D vonalelemként (A szoftver szóhasználatát vettem alapul, miszerint ennek az elemnek 1D vonalelem a neve) (20. ábra).



20. ábra: Numerikus modell

A modellezés során kettő terhelési ciklust lehet megkülönböztetni. Az első terhelési ciklusban, 10 terhelési lépcsőben a szerkezetre a feszítés és a szerkezet önsúlya kerül rá. A második terhelési ciklusban, negyven terhelési lépcsőben kerül rá a szerkezetre a külső teher. A vizsgálat elmozdulás vezérelt, vagyis az egyes terhelési lépcsőkben azonos nagyságú, függőlegesen lefele mutató eltolódás jelenik meg a szerkezeten.

## 5.2.2. Anyagmodellek definiálása

### 5.2.2.1. Beton [9]

A korábban elért tudományos eredmények alapján [1] [14] [15] [16] [19] vettem fel a betonra vonatkozó anyagmodellt. A számos tanulmány és cikk értelmezését, megértését követően lehetett az elért eredményeket alkalmazni a körüreges pallóra. Egy szerkezet nemlineáris vége-selemes analízise során különböző biztonsági szintek definiálhatók (21. ábra/ a) EC2 – „Safety Format). Az egyes formulák más és más elmélet alapjait veszik figyelembe, továbbá más képletek alapján határozzák meg a biztonsági követelményeket. Az ajánlások alapján én a „Mean” beállítást alkalmaztam. [10] A beton anyagmodell számos különböző elméleten alapul. A repedések lehetnek fixek (CERVANKA 1985, DARWIN 1974) vagy elforduló (VECCHIO 1986, CRISFIELD 1989). Húzásra a Rankine törési feltételt, nyomásra a Menetrey-William megalkotott modelleket veszi alapul. A nyomás hatására bekövetkező képlékenyedést a Menetrey-William törési felület írja le, amely három különböző feszültség invariánssal fejezhető ki. [9] [14]



EC2 | Basic | Tensile | Compressive | Miscellaneous | Element Geometry

Generate Material  
 Select checkbox and click update changes button to generate the material.

Strength Class: 50/60  
 Safety Format: Mean  
 Last Generation was Strength Class: 50/60  
 Last Generation was Safety Format: Mean

---

EC2 | Basic | Tensile | Compressive | Miscellaneous | Element Geometry

Material Prototype: CC3DNonLinCementitious2  
 Base Material Prototype: CC3DNonLinCementitious2

Young's Modulus-E: 37000 MPa  
 Poisson's Ratio-MU: 0.2  
 Tension Strength-FT: 4.1 MPa  
 Compression Strength-FC: -58 MPa

**Stress-Strain Law**

**Biaxial Failure Law**

---

EC2 | Basic | Tensile | Compressive | Miscellaneous | Element Geometry

Fracture Energy-GF: 0.000102 MN/m  
 Fixed Crack: 1

Activate Crack Spacing  
 Activate Crack Spacing Min  
 Activate Tension Stiffening  
 Activate Aggregate Interlock  
 Agg Size: 0.02 m  
 Activate Shear Factor  
 Activate Unloading factor

**Crack opening law**

**Crack opening law**  
 sigma rotated  
 fixed model starts when  
 $\frac{\sigma(w)}{f_t} < \frac{f_{tc}}{f_t}$  = fixed

---

EC2 | Basic | Tensile | Compressive | Miscellaneous | Element Geometry

Plastic Strain-EPS CP: -0.00089711  
 Onset of Crushing-FC0: -8.61 MPa  
 Critical Comp Disp-WD: -0.0005 m  
 Fc Reduction: 0.8  
 Activate Crush Band Min

**Peak compressive strain**

**Compressive ductility**

**Compressive strength reduction**  
 $f_c^{ef} = f_c \cdot f_c$

---

EC2 | Basic | Tensile | Compressive | Miscellaneous | Element Geometry

Excentricity-EXC: 0.52  
 Dir of pl Flow-BETA: 0.0

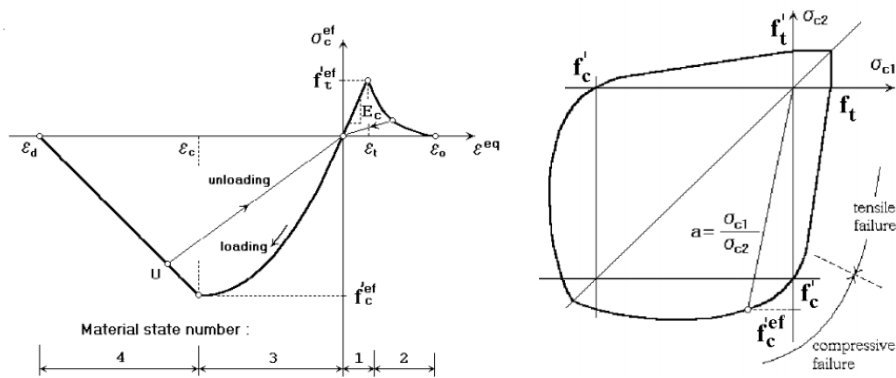
Rho-Density: 0.0023 kton/m³  
 Thermal Expansion-Alpha: 0.000012 C⁻¹

**Surface shape**

**Return (plastic flow) direction**  
 expanding volume: beta > 0  
 volume preserved: beta = 0  
 compaction: beta < 0  
 $\rho = \sqrt{2J_2}$   
 $\xi = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$

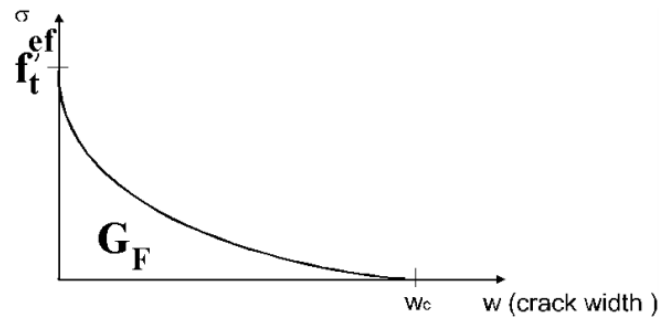
21. ábra: Beton anyagmodell

a) EC2c b) Alapadatok, c) „Húzás”, d) „Nyomás”, e) Egyéb



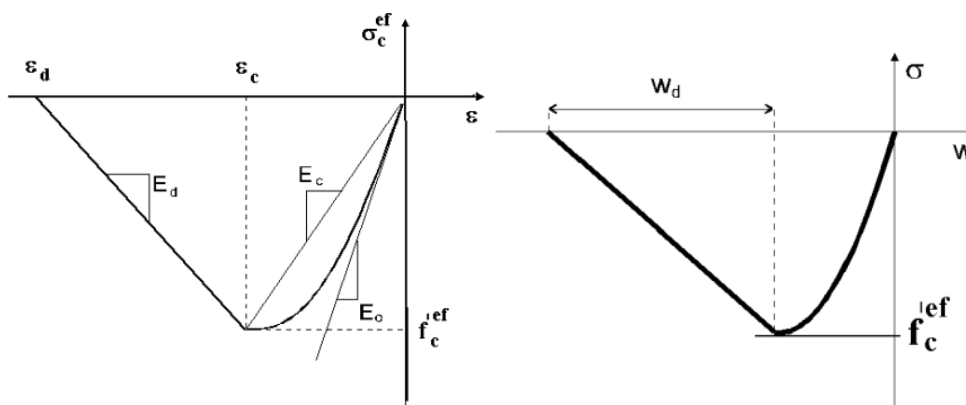
22. ábra: Beton anyagmodellek-1

a) Egytengelyű feszültség-alakváltozás diagram, b) Biaxiális törési felület [9]



23. ábra: Exponenciális repedésmegnyílás [9]

A repedésmegnyílás egy exponenciális függvénnyel írható le, amely függ a törési energiától és a húzószilárdságtól. Ennek az elméleti alapja kísérleti úton lett bizonyítva (HORDIJK 1991). [9].



24. ábra: Tönkremenetelhez közeli állapot

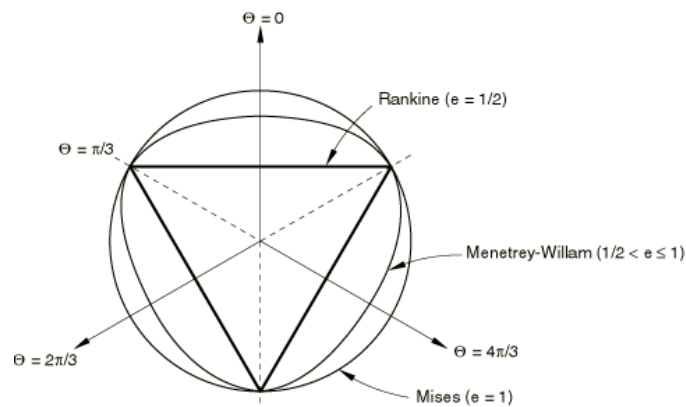
a) Nyomófeszültség-alakváltozás diagram, b) Fellazuló elmozdulás nyomás esetén [9]

Az elmélethez tartozó feltételezéseket kísérleti úton is igazolták (Van MIER 1986). [9]

Az elméleti háttérrel részletesebb leírás található az *ATENA Theory* [9] – 2.1.2 *Stress-Strain Relations for Concrete*, valamint 2.1.5 *Biaxial Stress Failure Criterion of Concrete* bekezdésekben.

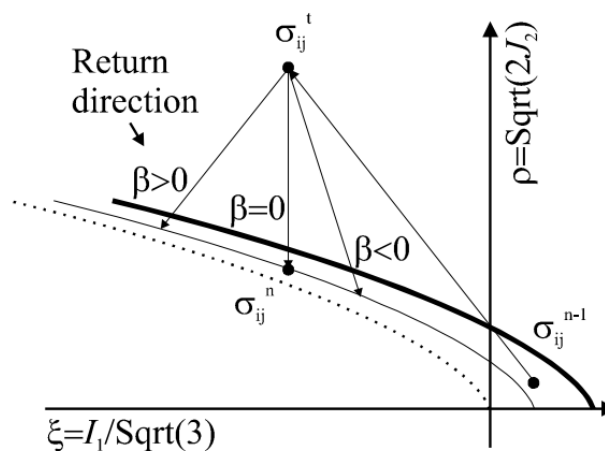
Érintőlegesen szeretném bemutatni a 21. ábra *Beton anyagmodell*, e) „Egyéb” felületen található excentricitási és *beta* tényező paramétereit (Részletesebb magyarázatot lásd. [9] 2.2.4 *Plasticity Model for Concrete Crushing* – 38.o).

Az excentricitás a Menetrey és a William által kidolgozott elméleten alapul [9] [11]. Az excentricitás 0,5 és 1,0 közötti értéket vehet fel a szoftverben és alapértelmezettként 0,52 van megadva. Minél közelebb van a 0,5-ös értékhez, annál szögletesebb a folyási felület. 1,0 érték esetén a folyási felület deviátoros metszete egy kör, vagyis a felület kisimul és illeszkedik a 0,5 érték esetén kapott szögletesebb felületre. [13]



25. ábra: Menetrey-William folyási felület deviátoros metszete [13]

A  $\beta$  tényező az úgynevezett visszatérési útvonalat (*Return direction*) írja le. (26.ábra)



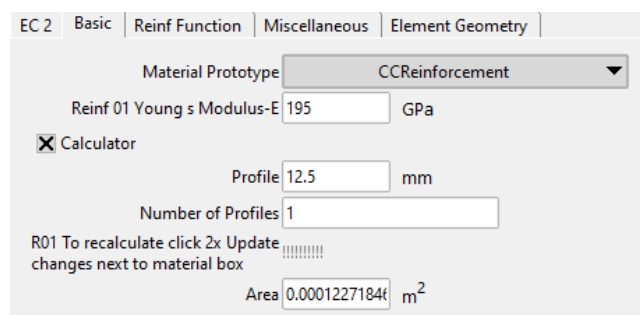
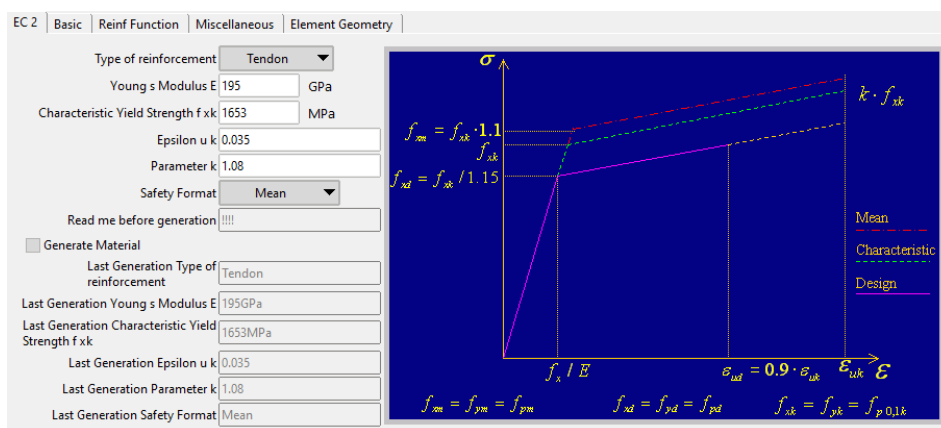
26. ábra: Visszatérési útvonal [9]

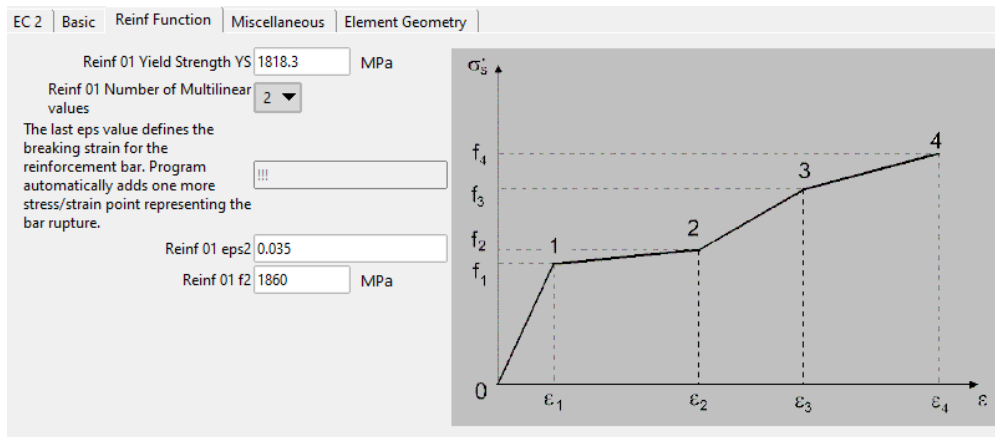
Ha a  $\beta < 0$ , akkor a törés során az anyag tömörödni fog, ezzel szemben, ha  $\beta = 0$ , akkor nem fog változni. Abban az esetben, ha  $\beta > 0$ , akkor az anyag tágulni fog.

Jellemzően a repedés utáni viselkedést befolyásolja a  $\beta$  tényező, azaz a képlékenyedés integrálját módosítja. Ha negatív értéket vesz fel, akkor rideg tönkremenetel alakul ki a repedések kialakulása után. Pozitív érték esetén lágyul az anyag, „kúszásszerű” viselkedést mutat.

### 5.2.2.2. Feszítőpáaszma [9]

A feszítőpáaszma 1D vonalelemként lettek modellezve. A korábban készített tanulmányokban, cikkekben [1] [14] [15] [16] [19] lágyvasalású szerkezeteket vizsgáltak, így ezeknek csak egy része szolgálhatott alapjául jelen tanulmánynak, hiszen a körüreges födémpallókban feszített páaszmaikat alkalmaznak. A beton és a feszítőpáaszma közötti kapcsolatot tökéletesnek feltételeztük, vagyis nem foglalkozunk az esetleges feszítőpáaszma megcsúszással, bár az anyagmodell beállításainál erre is lenne lehetőség. [24]

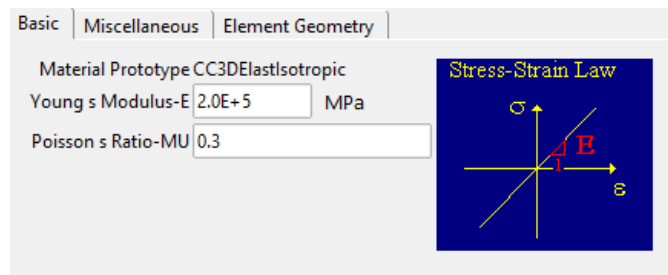




27. ábra: Feszítőpázsma anyagmodell

### 5.2.2.3. Acéllap

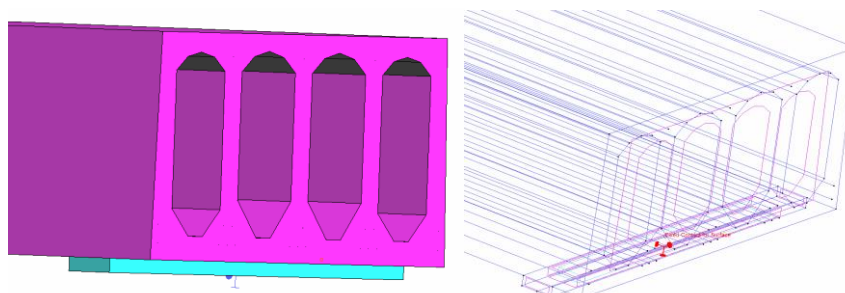
Az erőbevezetés környezetében és a megtámasztás definiálásához alkalmaztunk vékony acéllapokat. Az anyagmodellre jellemző, hogy lineárisan rugalmas valamint izotrop. Az acéllap anyagmodell felvétele a korábban elért tudományos eredmények [1] [14] [15] [16] [19] alapján történt.



28. ábra: Acéllap anyagmodell

### 5.2.3. Terhek, megtámasztások, monitorpontok

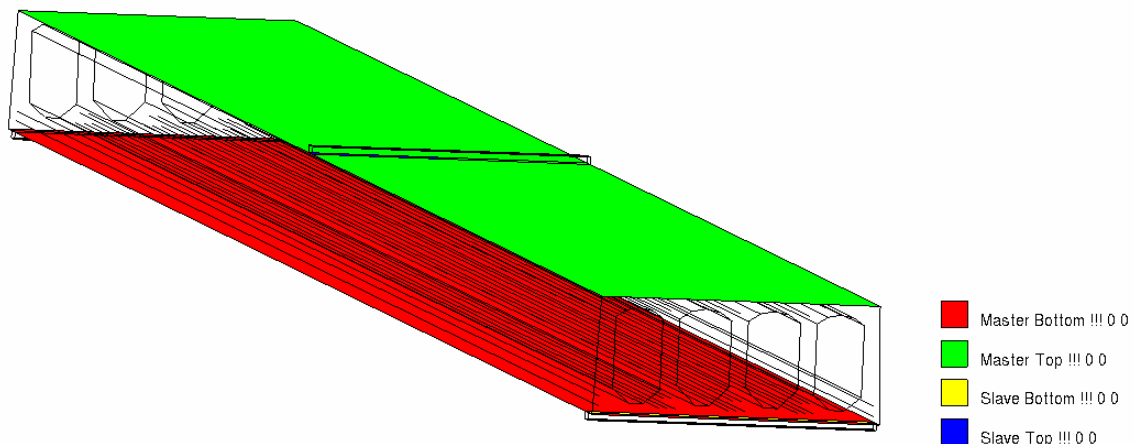
A modellezés helyességének érdekében a palló két végén acéllapokat kell modellezni. Az acéllapok alsó felületén, annak középvonalán vonalmenti támasz lett definiálva, úgy, hogy az egyik oldalon mind X, Y, Z szabadságfokok meg lettek fogva a globális koordináta-rendszerben, viszont a másik oldalon csak az X és Z szabadságfokok lettek megfogva (29. ábra).



29. ábra: Megtámasztási viszonyok

Az acéllapok csupán a modell helyességéért felelnek így, a palló és a lapok közötti kapcsolat tökéletesnek tekinthető. Viszont a kapcsolat megléte fontos, mert ennek hiányában a modell vagy nem fut le, vagy ha lefut, akkor az erő hatására az acéllap deformálódik és nem lesz tökéletes az erőátadás.

A szoftverben ez az úgynevezett „*Master-Slave*” kontaktelem, amelyben a „*Master*” szerep a pallóé és a „*Slave*” az acéllapé (30. ábra). [9]



30. ábra: *Master-Slave* kapcsolati elem

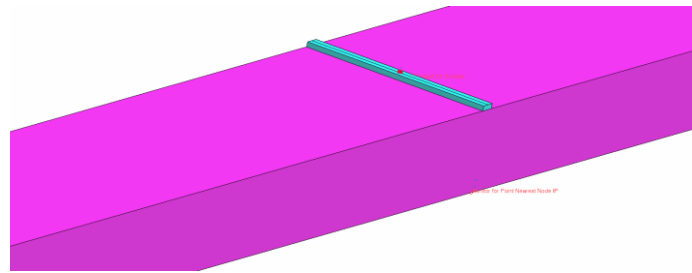
Mint említettem, a modell során kettő terhelési ciklust lehet megkülönböztetni. Az első esetben kerül rá a szerkezetre az önsúly, valamint a feszítés, a valóságnak megfelelően. A feszítés a 1D vonalelemekre alkalmazható *Initial Strain for Reinf Line* modullal történt, ahol fontos, hogy nem magát a kívánt feszültséget kell megadni, hanem a megkövetelt nyúlást, amit könnyen meg lehet határozni a feszültség ( $\sigma$ ) és rugalmassági modulus ismeretében ( $E$ ). Továbbá a megadott értéket negatív értéknek kell definiálni a szoftverben.

A második ciklusban kerül rá a szerkezetre a terhelés, ami a modellezésnél egy elmozdulás-vezérelt terhet jelent, azaz az egyes terhelési lépcsőkben azonos nagyságú, függőlegesen lefelé mutató eltolódást szenved a szerkezet. A feszítés, valamint az önsúly 10 terhelési lépcsőben kerül rá, a megadott 25 cm-es eltolódás viszont 40 terhelési lépcsőben.

Fontos, hogy a teher definiálásánál a teljes eltolódási értéket kell megadni és nem az egyes terhelési lépcsőkhöz tartozó értéket, mivel a szoftver a maximális megadott értéket automatikusan osztja fel a terhelési lépcsőknek megfelelően.

Részletesebb futtatási eredmények kimutatása monitorpontok segítségével lehetséges. Kettő darab monitorpont került elhelyezésre, egy a felső acéllap középső pontjában, az erőbevezetés környezetében, ezért ez a pont az erőt detektálja.

A másik monitorpont a tartó középső keresztmetszetének, alsó pontjában helyezkedik el és feladata, hogy detektálja az eltolódásokat (31.ábra).

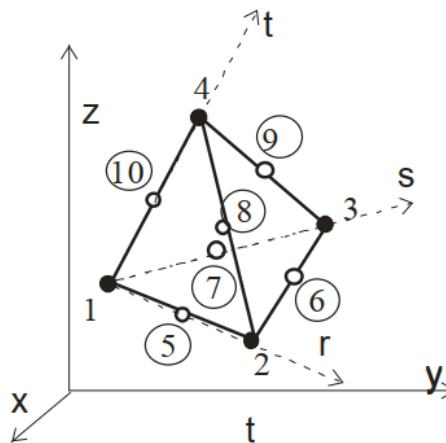


31. ábra: Monitorpontok helyzete

#### 5.2.4. Alkalmazott végeselem

A szoftverben lehetőség van különböző végeselemek kiválasztására. Mivel a körüreges födémfalló keresztmetszeti kialakítása viszonylag összetett, ezért az alkalmazandó végeselem a 4-10 csomópontú tetraéder végeselem (32.ábra).

A futtatások során 15 cm-es végeselemhálót alkalmaztam. Ehhez a hálózáshoz tartozó eredmények viszonylag jól megközelítették a valós kísérletből származó eredményeket. Kisebb hálózás esetén már jelentős számítógép kapacitással kell rendelkezni és a futtatási idő is exponenciálisan növekszik, főleg egy ilyen összetett és nagy méretű szerkezeti elem esetén. Az ezekhez tartozó részletesebb megállapítások és észrevételek a [11] -ben olvashatók.



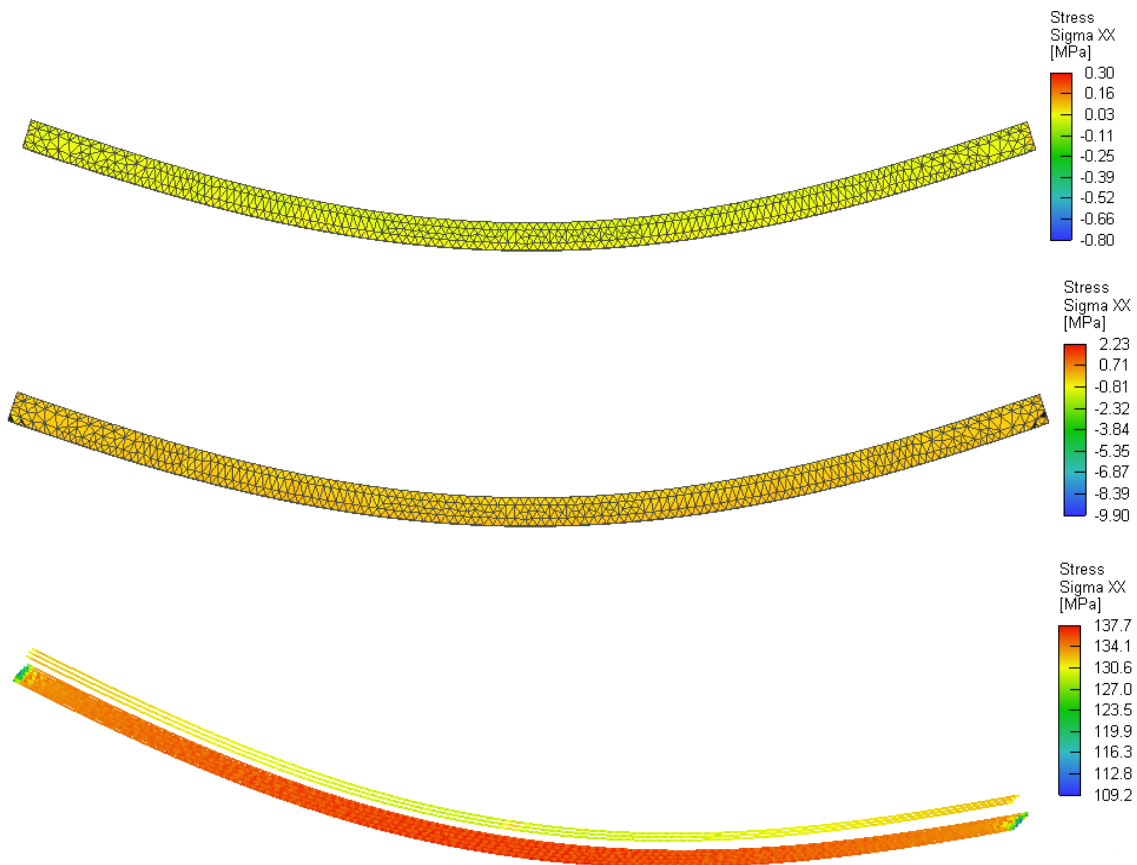
32. ábra: Tetraéder végeselem [9]

## 6. Numerikus eredmények

### 6.1. Megtámasztás hatása

Egy feszített szerkezet rendkívül érzékeny a megtámasztási viszonyokra, mivel a rossz megtámasztás miatt nem alakul ki a megfelelő feszítés. Ennek hatását röviden ismertetem.

Csupán 1 szabadságfok megváltoztatása esetén a feszítés már egyáltalán nem alakul ki a szerkezeten a modellben. (33.ábra)

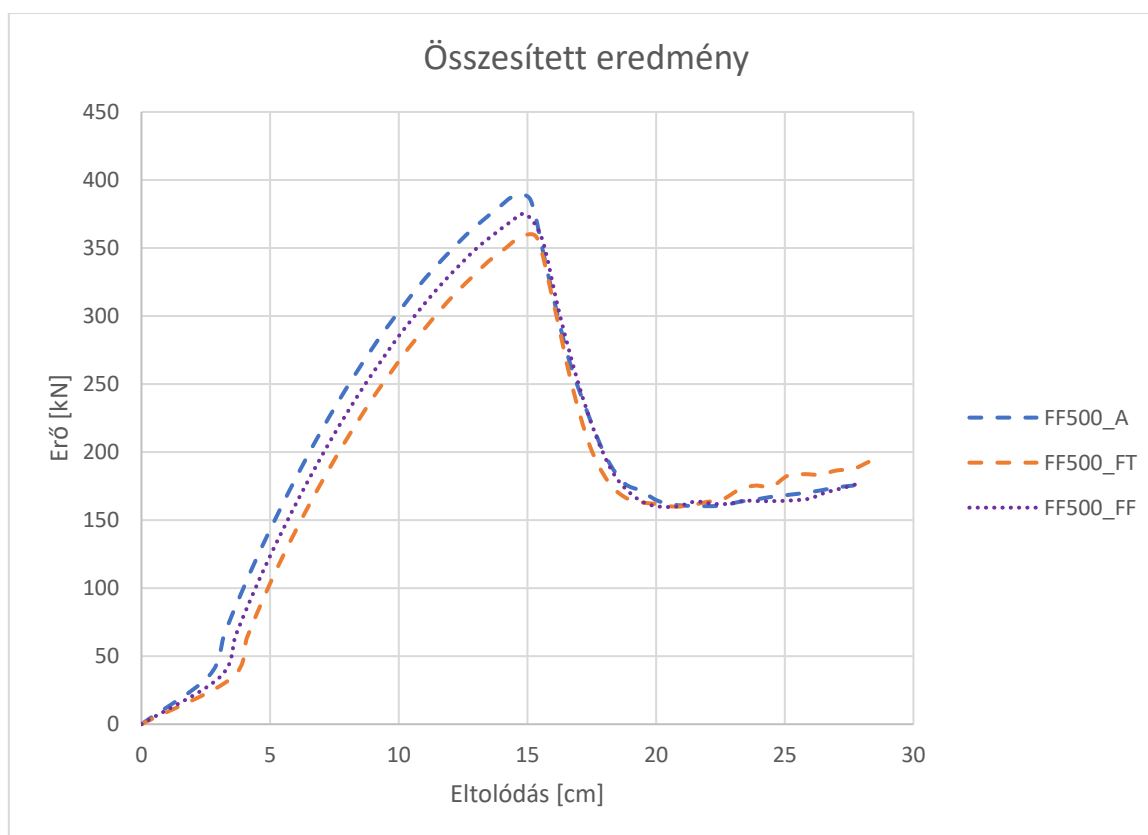


33.ábra: Feszítés hatása

a) 1. terhelési lépcső, b) 10. terhelési lépcső, c) Pázmák helyzete 1. terhelési lépcsőben

A feszítésből származó kényszer hatására egy szerkezet negatív értelemben vett eltolódást szenved. A 30. ábrán látható, hogy a feszítés ráengedésekor, az első terhelési lépcsőben már a tartó lefele görbül és ez egészen a 10. terhelési lépcsőig változatlan, tehát egyetlen terhelési lépcsőben sem fog felfele görbülni a palló. A 34. ábrán látható, hogy a kapott erő-eltolódás diagram jellegében merőben eltérő, mint a valós kísérletből származó diagram.





34. ábra: Rossz megtámasztási viszonyok

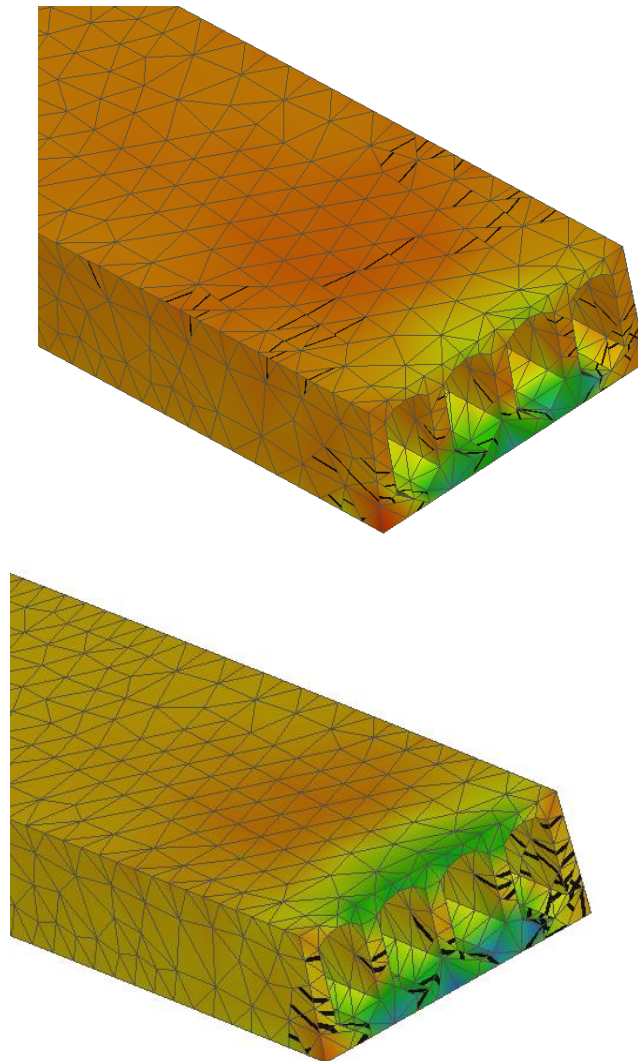
Az *FF500\_A* esetén csak az alsó pászmasor lett megfeszítve, az *FF500\_FT* görbe az alsó és felső pászmasor megfeszítéséből adódik. Ha a felső pászmasor csak fele annyira van megfeszítve, mint az *FF500\_FT* esetben, akkor ennek a görbének az előbb említett kettő görbe között kell lennie, ezt mutatja az *FF500\_FF*. A berepedés előtti lineáris szakasz mind a három esetben 33-34kN-ig tart, az ehhez tartató eltolódás 2,5-3,5cm között van. A berepedés viszonylag gyorsan bekövetkezik és a görbe már nem lesz lineáris. A tartó tönkremeneteléhez tartozó erő és eltolódás 385kN, valamint 14,5-15cm. A tartó tönkremenetele hirtelen következik be és a leszálló ág meredeksége is nagy.

Mind a három modell esetén az egyik oldalon, mind X, Y, Z eltolódás meg lett fogva, valamint a másik oldalon X, Z szabadságfokok lettek megfogva. A futtatások előtt mindig győződjünk meg a megtámasztás helyességéről!

## 6.2. Felső pászma hatása

A körüreges födempallóban a feszítőpázmákat általában egyaránt elhelyezik az alsó sorokban és a felső sorokban. A következő numerikus futtatásból származó feszültségábrákból látható, hogy miért szükséges elhelyezni és megfeszíteni alul és felül is a feszítőpázmákat (35.ábra).

Első körben a feszítés modellezését vizsgáltam és a feszítő erő ráengedését külön modelleken elemeztem.

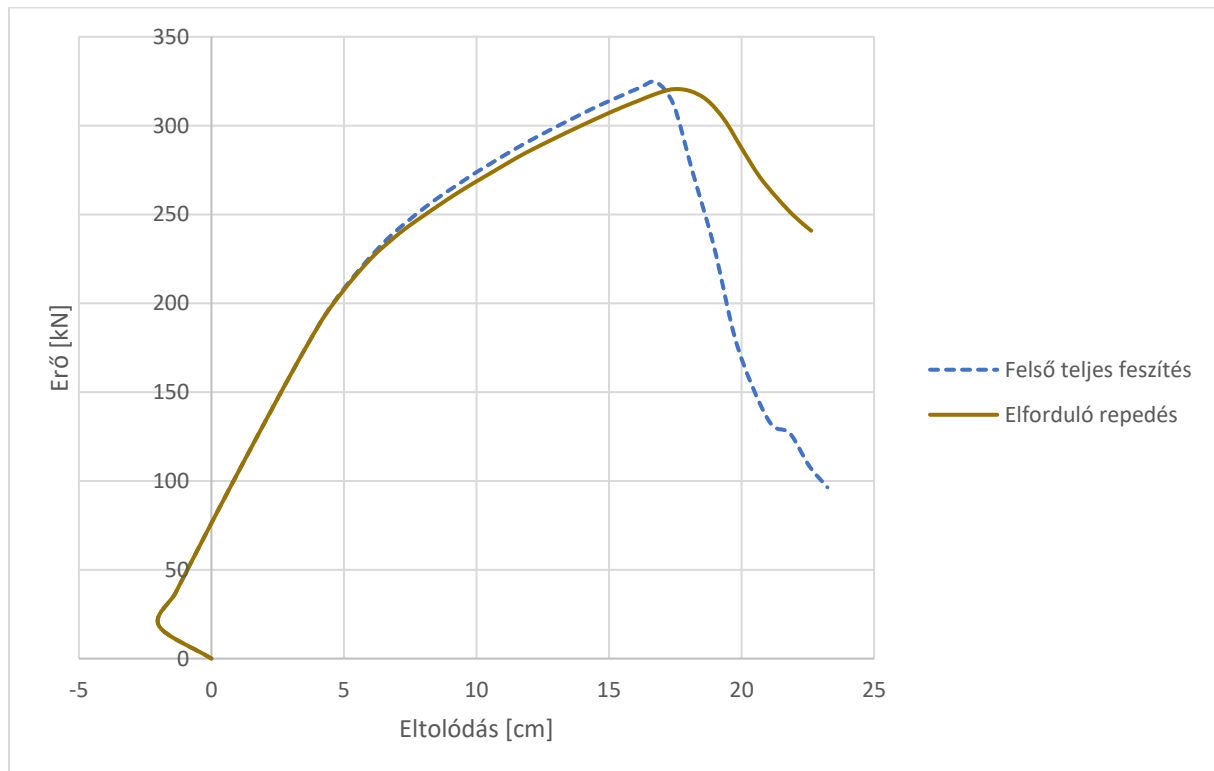


35. ábra: Felső pászma hatása

a) Felső pászma feszítés nélkül, b) Felső pászma megfeszítve

A feszítést több lépcsőben adtuk rá a szerkezetre. A teljesen megfeszített elem tartó végének feszültség ábráit lásd 35. ábrán. A 35.(a) ábrán csak az alsó, a 35.(b) ábrán az alsó és a felső feszítőpázmák is meg lettek feszítve. Az eredményekből egyértelműen megállapítható, hogy a felső pászmasor feszítése nélkül a tartó felső része bereped. A tartó tengelyére merőleges, azaz keresztirányú repedések jelennek meg.

### 6.3. Elforduló és fix repedésterjedési modellek



36.ábra: Elforduló és nem elforduló repedések

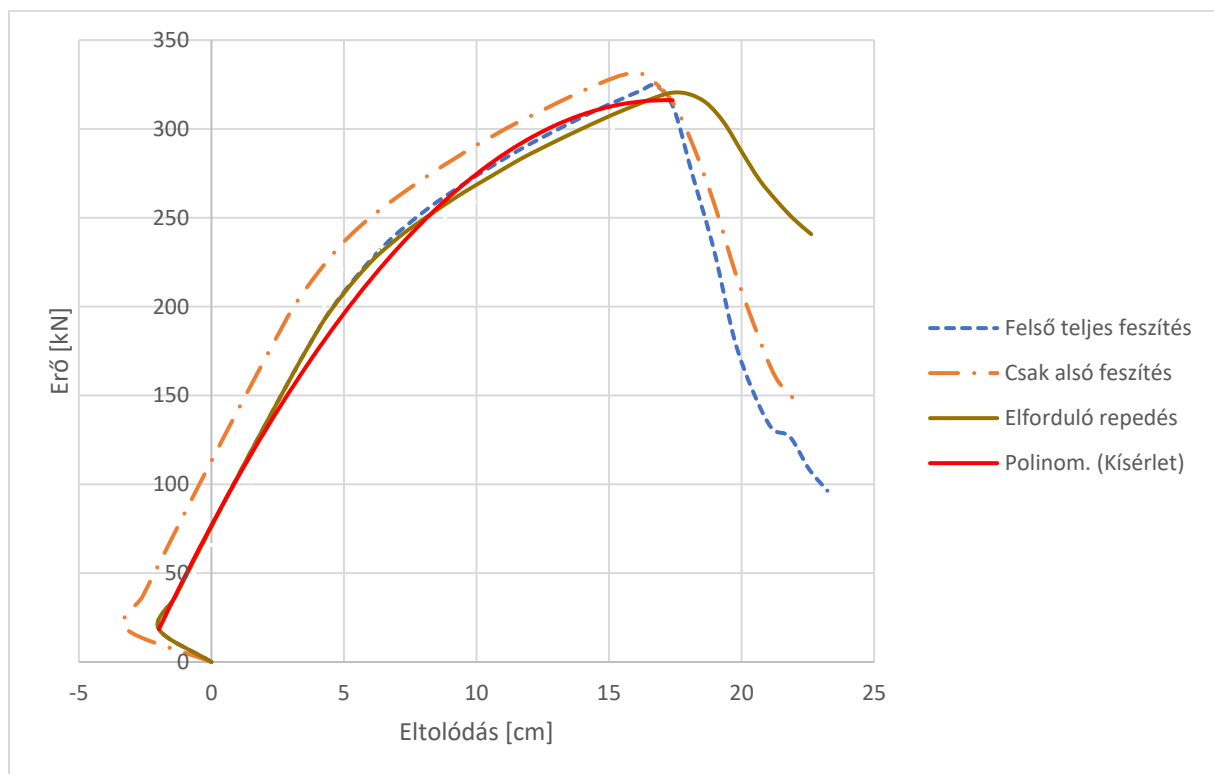
Vasbeton szerkezetek repedésterjedésére alapvetően két modell használható: az úgynevezett elforduló és a fix repedésterjedési modell. A szoftverben ennek a beállítási lehetősége a 21/c ábrán látható, „Fixed Crack” név alatt. A részletesebb magyarázat megtalálható az [9]-ben, 2.1.6.1 *Fixed Crack Model* valamint a 2.1.6.2 *Rotated Crack Model*. A 35. ábrán, kék szaggatott vonal jelöli a fix repedési modellel előállított numerikus eredményt, és a barna folytonos vonal az elforduló repedésterjedési modell esetén kapott numerikus eredményt. Valóságban a mikrorepedések megjelenésénél még a repedések elfordulhatnak, majd a berepedést követően fixnek tekinthetők. Egy továbbfejlesztett „vegyes” repedésterjedési modell képes lenne talán leírni ezt az összetettséget, de jelen tanulmányban ilyen szintű összetett modellel nem foglalkoztam.

Megnevezés	Repszőerő [kN]	Repszőerőhöz tartozó elmozdulás [cm]	5cm elmozduláshoz tartozó erő [kN]	10cm elmozduláshoz tartozó erő [kN]	15cm elmozduláshoz tartozó erő [kN]	Törőerő [kN]	Törőerőhöz tartozó elmozdulás [cm]
Fix repedés	199,23	4,74	206,26	272,83	313,16	324,43	16,77
Elforduló repedés	205,62	4,89	217,00	267,69	306,49	319,45	18,05
Eltérés	3,21%	3,16%	5,21%	1,88%	2,13%	1,53%	7,63%

4. táblázat: Elforduló és nem fix repedés eredmények összehasonlítása

A törőerőig számottevő különbség nem mutatkozott a két modell esetén és a törőerő is szinte azonos. A fix repedés esetén a törőerő 199,23kN míg az elforduló esetben ez 205,62kN, így 3,21% eltérés adódott. A törőerőhöz tartozó eltolódások 4,74cm és 4,89cm, az eltérés 3,16%. A nemlineáris szakaszt tekintve nagyobb különbség nem látható, az eltérések 1,9-5,6% között vannak. A törőerők 324,43kN és 319,45kN (1,53% eltérés) és az ezekhez tartozó eltolódás 16,77cm és 18,05cm (7,63% eltérés). Látható, hogy a görbék a tönkremenetelhez közeli állapotban térnek el. A törőerők szinte megegyeznek, viszont az eltolódások között közel 7,63%-os eltérés van. Arra a következtetésre jutottam, hogy az elforduló repedés az erő-eltolódás diagram tönkremenetelhez közeli állapotát befolyásolja, azon belül is jelentősebben az eltolódásokat.

#### 6.4. Numerikus és valós kísérleti eredmények



37.ábra: Eredmények összehasonlítása

A valós kísérlet során a palló teherbírásának meghatározása volt szem előtt tartva, így abban az esetben a pallót nem tették tönkre. A méréseket csak bizonyos teherszinteken végezték el, így a kapott erő-eltolódás pontpárokból függvény illesztéssel készítettünk görbét. Alapvetően egy kísérletből származó mérési eredmény állt rendelkezésre, mellyel azonban össze tudtuk hasonlítani a numerikusan kapott eredményeket.

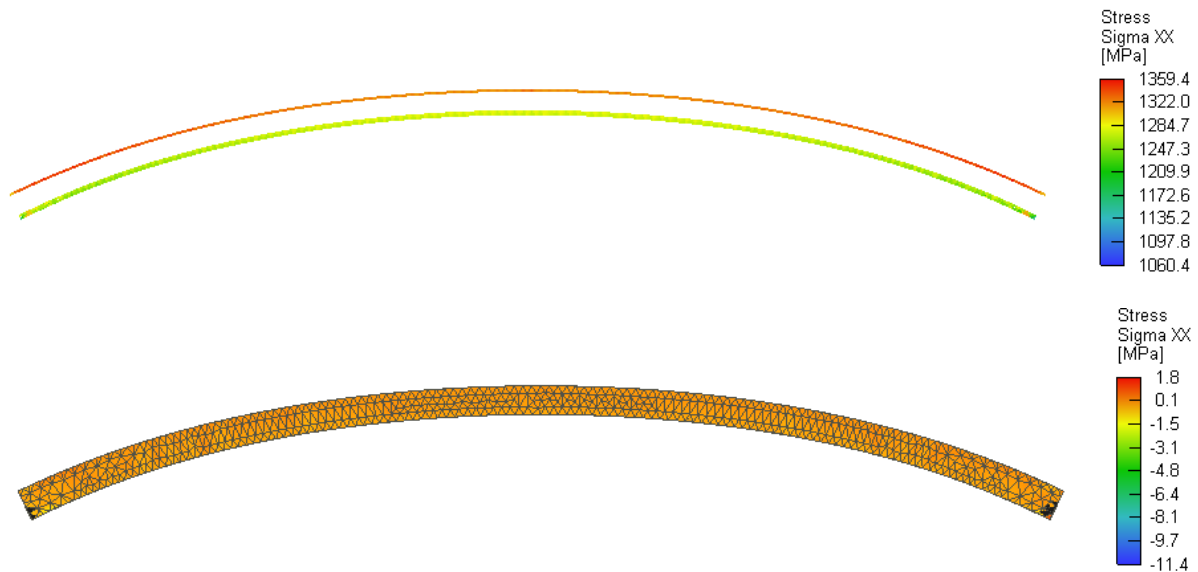
A végeelemes számításokkal kapott erő-eltolódás görbék kezdeti szakasza eltér a laboratóriumi kísérletekben kapott eredményektől. A diagramon a negatív értelemben vett eltolódás a tartó feszítéséből származó, függőlegesen felfelé irányuló eltolódást jelent (38.ábra). Az eredmények összehasonlíthatósága érdekében így a valós kísérletekből kapott eredményeket a feszítésből kapott eltolódás értékével el kellett tolnunk.

Megnevezés	Repsztoerő [kN]	Repsztoerőhöz tartozó elmozdulás [cm]	5cm elmozduláshoz tartozó erő [kN]	10cm elmozduláshoz tartozó erő [kN]	15cm elmozduláshoz tartozó erő [kN]	Törőerő [kN]	Törőerőhöz tartozó elmozdulás [cm]
Kísérlet	187,48	4,81	194,63	276,16	321	-	-
Fix repedés	199,23	4,74	206,26	272,83	313,16	324,43	16,77
Elforduló repedés	205,62	4,89	217,00	267,69	306,49	319,45	18,05
Csak alsó f.	224,29	4,91	235,27	290,30	327,26	331,45	16,16
Eltérés [%]	5,90%	-1,48%	5,64%	-1,22%	-2,50%	-	-
(kísérlethez képest)	8,82%	1,64%	10,31%	-3,16%	-4,73%	-	-
	16,41%	2,04%	17,27%	4,87%	1,91%	-	-

5. táblázat: Eredmények összehasonlítása

Látható, hogy csak alsó feszítés esetén a kísérlethez képest kiugró értékek adódtak. Valós kísérletnél a repesztőnyomaték 187,48kN míg a numerikus eredmény 224,29kN (16,41%-os eltérés) és az ehhez tartozó eltolódások 4,81cm, valamint 4,91 cm (2,04% eltérés). 5cm-es eltolódáshoz tartozó erők 194,63kN és 235,27kN (17,27% eltérés). A tönkremenetelhez tartozó erőt és eltolódást nem lehet összehasonlítani, mivel a valós kísérlet során a pallót nem tették tönkre, ezért erről nem áll rendelkezésre adat. Látható, hogy a valós kísérlethez legközelebb a fix repedésekkel rendelkező modell áll. Ebben az esetben a repesztőerő 199,23kN és a valós kísérlethez képest 5,90% eltérés adódott, valamint az eltolódás 4,74cm és 1,48% az eltérés. Az 5cm, 10cm és 15-cm-hez tartozó erők 206,26kN, 272,83kN, 313,16kN és az eltérések rendre 5,64%, 1,22% valamint 2,50%. Elforduló repedéseknél nagyobb eltérés adódott a fix repedésekhez képest, de kisebb, mint a csak alsó feszítés esetén. Ebben az esetben a repesztőerő 205,62kN, az eltérés 8,82%, valamint az 5cm esetén látható a legnagyobb eltérés. 5cm-es eltolódáshoz tartozó erő 217,00kN, az eltérés 10,31%.

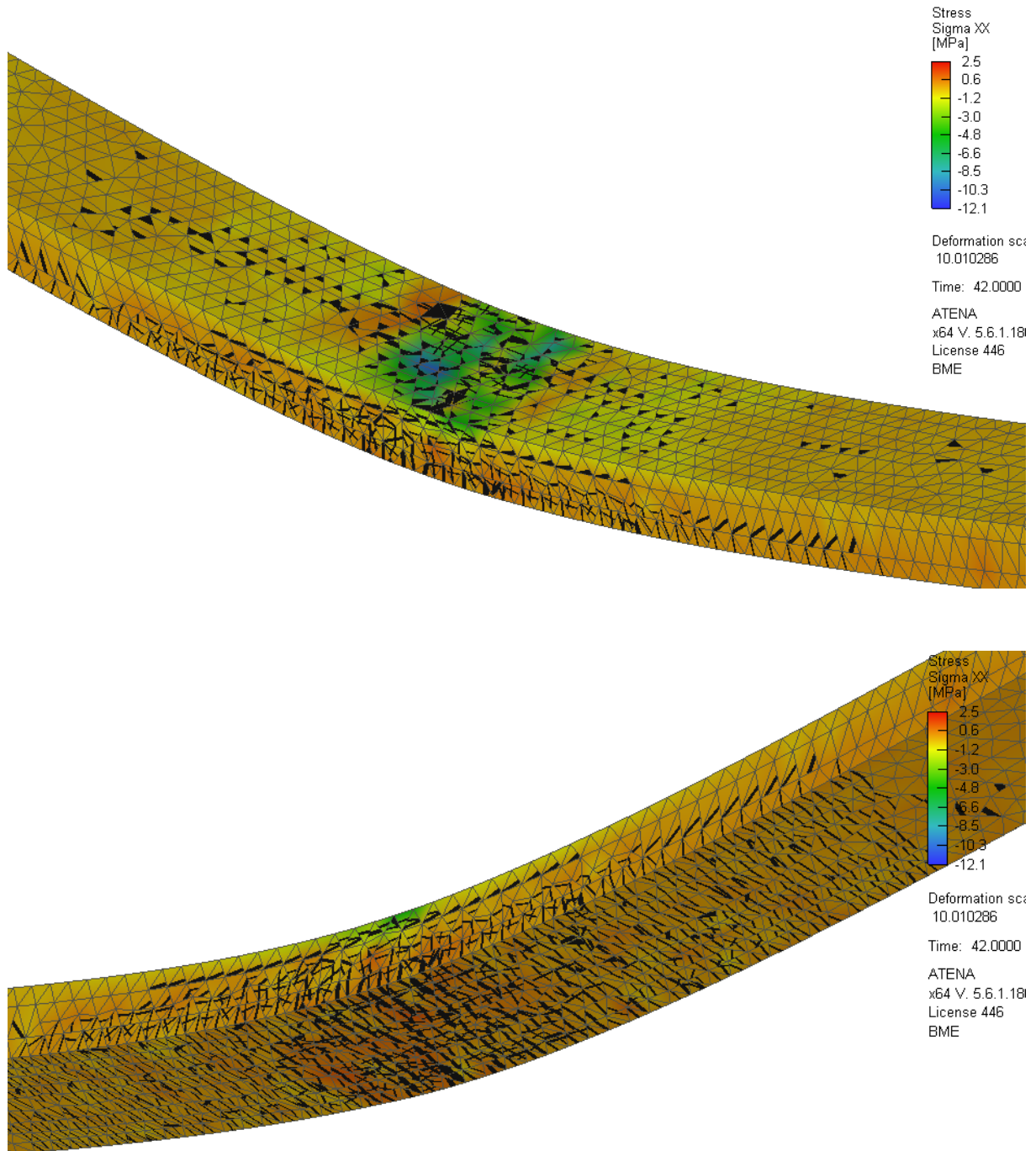
Megállapítható, hogy a fix repedéseket kell alkalmazni, hiszen ekkora az eltérés 1-6% között van.



38. ábra: Feszítés hatása

A tönkremeneteli állapotban a numerikus vizsgálattal kapott feszültség ábrát és repedésképet a 39. ábrán szemléltettük. A tönkremeneteli forma az adott terhelési elrendezésre jellemző hajlítási tönkremenetel. A tartó középső keresztmetszeténél az alsó húzott övön a hajlítási repedésekre jellemző, a tartó tengelyére merőleges repedések jelentek meg (39/d ábra), valamint a repedések a felső nyomott zónába is felértek. A vizsgált tartó a felső nyomott zóna összemorzsolódásával ment tönkre, melyet a palló felső felületén megjelent számos repedés is mutat. (39/c ábra)





39.ábra: Tönkrementel pillanata

a) Oldalnézet, b) 3D nézet, c) Felső nyomott öv, d) Alsó húzott öv

## 7. ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozatban bemutatom általánosságban az előregyártást, az ehhez tartozó előnyöket és hátrányokat. A hátrányból adódó szállítási és emelési nehézségek megoldását. Magyarországon kereskedelmi forgalomban elérhető pallók gyártóinak egyes ajánlásait, csomópont kialakítási lehetőségeket. A szakirodalmi kutatás keretén belül a tanulmányom szempontjából fontosabb kutatási területeket kiemelem, valamint a fellelhető kevés tanulmányt specifikusan a feszített vasbeton körüreges födempallókra megemlítem.

Kitűzöm a kutatás célját, azt a fontos tény, amiért belevágtam ennek a tanulmánynak az elkészítésébe. Részletezem a valós kísérletet, a vizsgált födempallót a teherlépcsőket, a teherelrendezést és az ott elért eredményeket, amelyek mind a dolgozatom alapjául szolgálnak. Mindezek után rátérek a numerikus modell felépítésére, az ott alkalmazott keresztmetszet egyszerűsítés okaira. Részletesen taglalom, hogy az egyes elemek esetén (beton, pászma, acéllap) milyen anyagmodelleket alkalmaztam és ezek milyen elméleti háttér, kutatási eredmények alapján lettek így felvéve. Kiemelem és hangsúlyozom a helyes megtámasztási viszonyokat, illetve bemutatom mi történik akkor, ha nem megfelelően modelleztük a megtámasztást. Továbbá ismertetem a terheket és az úgynevezett monitorpontokat, amelyek segítségével előállítható egy erő-eltolódás diagram. Bemutatom, hogy a födempalló és az acéllapok között milyen kapcsolati elemeket kell alkalmazni a modell helyességének érdekében, illetve az alkalmazott végelemekre is kitérek.

Végezetül az eredmények során bemutatom a felső pászmák hatását, az elforduló és fix repedésterjedési modelleket, illetve összevetem a numerikus eredményeket a valós kísérletből származó eredményekkel.

## 8. KONKLÚZIÓ

Az előző fejezetben összefoglaltak alapján az alábbi következtetések vonhatók le:

- Helytelen megtámasztás esetén a feszítés egyáltalán nem alakul ki és teljesen eltérő viselkedést mutat a szerkezet. Fontos, hogy a futtatások előtt bizonyosodjunk meg a helyes megtámasztási viszonyokról.
- A felső pászma megfeszítése nélkül, a tartó végén keresztirányú repedések jelentkeznek, amik egy ilyen szerkezet esetén (nagy keresztmetszeti magassággal rendelkező palló esetén) elfogadhatatlan. A repedések már akkor is jelentkeznek, ha kisebb feszítőerőt alkalmaznak. Továbbá a felső pászma feszítése nélkül jelentős eltérések adódtak a valós kísérlethez képest, melyek esetenként 17%-ot.



- Az általam fejlesztett numerikus modellekből származó eredményeket összehasonlítva a valós kísérletből származó eredményekkel a berepedés előtti lineáris szakasz megegyezett. A nem elforduló, azaz fix repedések alkalmazása mellett az eltérés 1-6%-on belüli. Elforduló repedések nagyobb eltérést okoztak. A legnagyobb eltérés az 5cm eltolódáshoz tartozó erők összehasonlításánál 10,31%. Valós viselkedést követő modell egyszerre tartalmazza a fix és elforduló repedéseket, de ez már egy összetettebb anyagmodellt jelent. Berepedésig elforduló repedéseket kell figyelembe venni és berepedést követően, azaz a mikrorepedéseket után fix repedéseket.
- A valós kísérlet során a pallót nem tették tönkre így adathiány miatt a görbe ezen szakaszát nem tudtuk összehasonlítani, így egyelőre csak a numerikus modellezés eredménye áll rendelkezésre.
- A numerikus modell az elvártak szerint ment tönkre, vagyis a felső nyomott zóna összemorzsolódásával.
- Egy esetleges paramétervizsgálattal a numerikus modellek még tovább fejleszthetők így nagyobb pontosságot lehet elérni. Ezekből a vizsgálatokból levont következtetéseket és konklúziókat felhasználva kiterjeszhető a vizsgálat más pallókra is.

## 9. FELADAT NEHÉZSÉGEI

Az eddig tanulmányok során ehhez hasonló összetett szoftverrel még nem találkoztunk. Rengeteg olyan paraméter beállítási lehetőség volt, aminek a mögöttes jelentését, viselkedését meg kellett érteni. Sok esetben hibaüzenetet dobott ki a program és hibásan, vagy egyáltalán le se futott a program. Rengeteg időt emésztett fel az ehhez hasonló hibaüzenetek megfejtése és megoldása.

Eddig tanulmányok során feszítést még nem modelleztünk, így ennek helyes modellezése is kihívás volt. A szoftverben számos lehetőség van ennek modellezésére, de ezek közül nem minden esetben kaptunk kielégítő eredményt.

A szerkezeti elem összetett kialakítása, illetve nagy méretei miatt viszonylag sok végelemre kellett felosztani, így a futtatási idő megnövekedett. A hibaüzenetek sok esetben nem a futtatás előtt jelentkeztek, hanem a sokadig teherlépcső után, így ismét rengeteg időt emésztett fel, mire kiderült, hogy valójában hiba van a modellben.

## *10. TOVÁBBI KUTATÁSI LEHETŐSÉGEK*

- A korábban elért [14], [15], [16], [17], [18] és a palló numerikus vizsgálataival elért eredményeket felhasználva további kutatási területek nyílnak meg. Az előregyártott palló vizsgálatai bár még kezdeti fázisban vannak, az elért eredmények jó kiindulási alapnak minősülnek a hasonló szerkezeti elemek vizsgálatain során.
- Körüreges palló bemenő adatainak anyagmodell szintjén meghatározott paramétervizsgálata, mellyel a korábban fejlesztett modellezési technika továbbfejleszthető.
- A paraméteres vizsgálat továbbá lehetőséget nyújt a kereskedelmi forgalomban elérhető más típusú és geometriájú körüreges pallók numerikus vizsgálatának elvégzésére is. Lehetőség van továbbá új körüreges pallók fejlesztésére, illetve azok kialakításának, keresztmetszetének optimalizációjára is.
- A vizsgált előregyártott szerkezeti elemek alapvetően más szerkezeti elemekre támaszkodnak végleges állapotukban, így azok kapcsolatainak kialakítása szintén numerikus modellekkel vizsgálhatók. A pallók elhelyezése történhet előregyártott- és monolit vasbeton szerkezeti elemekre, valamint téglafalazatra is. Az egyes csomóponti kialakítások esetén a gyártó által megadott ajánlások más és más elhelyezési technológiát adnak meg, így ezeket szintén külön-külön vizsgálni lehet végeselemes számításokkal.
- A pallók számos esetben kerülnek beépítésre kiegészítő monolit (vasalt) felbeton réteggel. A felbeton réteg vastagsága változó lehet, így azokat szintén paraméteres numerikus számításokkal lehet vizsgálni. A felbetonnal ellátott pallók esetében felmerül a felbeton és a beton közötti kapcsolat kialakításának modellezési lehetőségei. Ennek érdekében a numerikus modellezési eljárás további fejlesztésen kell átesse és egy olyan anyagmodellt kell parametrizálni, mely megfelelően képes az eltérő időben betonozott rétegek közötti kapcsolatot modellezni.

## *11. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS*

Ezúton is szeretném megköszönni Dr. Haris Istvánnak a támogatását, biztatását és tippjeit, amelyet a dolgozatom elkészítése során nyújtott.

Továbbá szeretném megköszönni Roszevák Zsoltnak segítőkészségét és jótanácsait a modellezéssel kapcsolatban.

Köszönettel tartozunk továbbá a Ferrobeton Zrt.-nek a munkánk alapjául szolgáló laboratóriumi kísérleti eredményekért.

## Felhasznált irodalom

- [1] Bogár B., Blázsán D., Haris I., Roszevák Zs. Különböző csomóponti numerikus modellek hatása egyszerű előregyártott vasbeton keretváz igénybevételeire (2019)
- [2] Épületszerkezettervezés metodikája – BMEEOEMA-A1: Vasbeton ipari csarnokvázak előadás
- [3] Szerkezetek Szerelésének Szervezése – BMEEPEKASD5: Előadás fóliák
- [4] Ferrobeton Zrt. – Körüreges födémekhez tervezési és alkalmazási útmutató
- [5] Magasépítési vasbetonszerkezetek – BMEEOHSA-A2: 5.előadás, Feszítés
- [6] LEIER – Födémrendszerek alkalmazástechnika és tervezési segédlet
- [7] SW-Umwelttechnik – Körüreges sík födémpanelek tervezési és alkalmazási segédlet
- [8] Ferrobeton Zrt.: FF500 jelű előfeszített vasbeton körüreges födempalló próbaterhelési adatszolgáltatás
- [9] Červenka Consulting – ATENA Theory
- [10] Anton Ekesiöo, Andreas Ekhamre: Safety formats for non-linear finite element analyses of reinforced concrete beams loaded to shear failure (2018)
- [11] Roszevák Zsolt – Előregyártott vasbeton gerendák numerikus és kísérleti vizsgálata (2015)
- [12] Abaqus Theory (2016)
- [13] Roszevák Zsolt - Vasbeton szerkezetű épület viselkedésének vizsgálata különböző numerikus modellezési módszerekkel (2015)
- [14] Haris I., Roszevák Zs. (2017), „Előregyártott vasbeton gerendák numerikus és kísérleti vizsgálata” Vasbetonépítés: A FIB magyar tagozat lapja: Műszaki folyóirat XIX: (1) pp. 2-11., 2017.
- [15] Roszevák Zs., Haris I. (2019), „Monolit vasbeton keretsarok numerikus vizsgálata - 1. rész Egyirányú monoton növekvő terhelés” Vasbetonépítés: A FIB magyar tagozat lapja: Műszaki folyóirat XXI: (3) pp. 78-86., 2019.
- [16] Roszevák Zs., Haris I. (2020), „Monolit vasbeton keretsarok numerikus vizsgálata - 2. rész Ciklikusan változó terhelés” Vasbetonépítés: A FIB magyar tagozat lapja: Műszaki folyóirat XXII: (3) pp. 73-82., 2020.

- [17] Roszevák Zs., Haris I. (2019), „Finite element analysis of cast-in-situ RC frame corner joints under quasi static and cyclic loading”, *Revista de la Construcción*, 18: (3) pp. 579-594. (2019)
- [18] Roszevák Zs., Bodó P. B., Haris I., Vasbeton síklemez egyenértékű kerettel történő helyettesítése vízszintes teher numerikus vizsgálatok alapján, XIII. Magyar Mechanikai Konferencia, Miskolc, 2019.
- [19] Z. Roszevák, I. Haris: The effect of non-linear finite element analysis on the description of the global behavior of a prefabricated skeleton
- [20] FIB Bulletins Design principles for hollow-core slabs regarding shear and transverse load bearing capacity, splitting and quality control (1982)
- [21] SpringerOpen: Experimental and Numerical Assessment of Flexural and Shear Behavior of Precast Prestressed Deep Hollow-Core Slabs (2020)
- [22] Engineering Structures: Numerical study on the flexural behaviour of slim-floor beams with hollow core slabs at elevated temperature (2019)
- [23] Sustainability: Steel-Concrete Composite Beams with Precast Hollow-Core Slabs: A Sustainable Solution (2021)
- [24] Mohammed A. Abed, Zaher Alkurdi, Ahmad Kheshfeh, Tamás Kovács, Salem Nehme: Numerical Evaluation of Bond Behavior of Ribbed Steel Bars or Seven-wire Strands Embedded in Lightweight Concrete (2020)

## Mellékletek

[A] A födémek közötti hézagok betonszükséglete (Ferroboton) [4]

Födempalló jele	Szükséges beton [l/m <sup>2</sup> ]
FF-160	6,0
FF-200/6	7,5
FF-265	11,0
FF-320	15,3
FF-400	19,5

[B] A födémek közötti hézagok betonszükséglete (LEIER) [6]

Hézagkitöltő betonmennyiség	
Födém típus	Kitöltő beton [l/m <sup>2</sup> ]
LÜF 16	5,2
LÜF 20	6,4
LÜF 26,5	8,4
LÜF 32	11,4
LÜF 40	12,3
LÜF 45	13,4
LÜF 50	16,9