



Trapézlemez gerincű tartók beroppanásvizsgálata

Patch loading resistance of girders with corrugated webs

KÖVESDI Balázs

PhD disszertáció

Témavezetők:

DUNAI László

Ulrike KUHLMANN



Bevezetés

1. Szerkezeti kialakítás ismertetése
2. Problémafelvetés – célkitűzés – kutatási stratégia
3. Kidolgozott témakörök
 - 3.1. Numerikus modellezés és paramétervizsgálat
 - 3.2. Kísérleti program végrehajtása
 - 3.3. FEM alapú méretezési eljárás kidolgozása
 - 3.4. Külponos terhelés vizsgálata
 - 3.5. Parciális tényező meghatározása
 - 3.6. Nyíró- és keresztirányú erő kölcsönhatásának vizsgálata
4. Kutatás összefoglalása, új tudományos eredmények

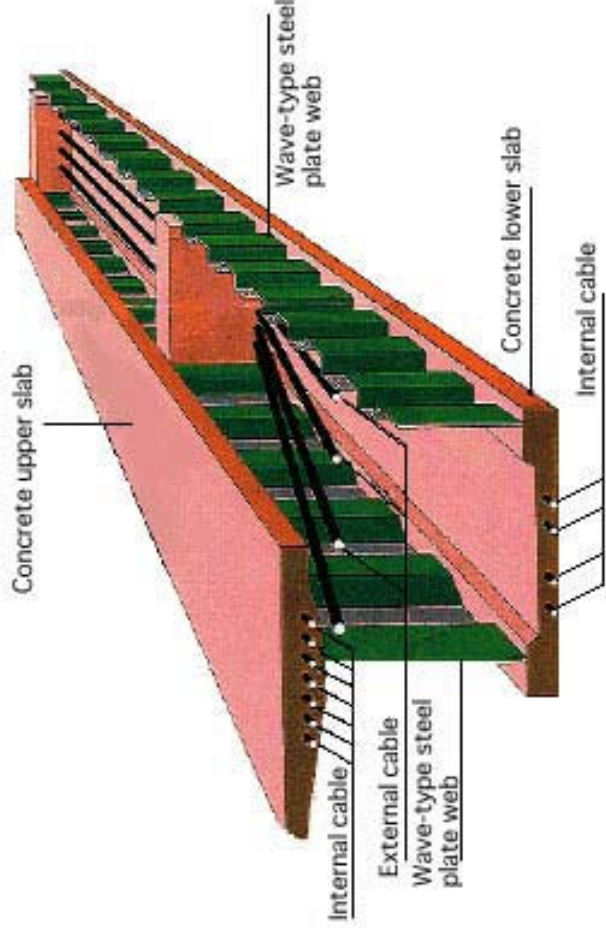


Szerkezeti kialakítás

Öv vasbetonból

Gerinc acél
profillemezről

- Elmúlt 20 évben fejlődött ki.
- Első ilyen típusú hídát Franciaországban építették.
- Japánban kedvelt szerkezeti kialakítás.
- Magyarországon is aktuális a téma.



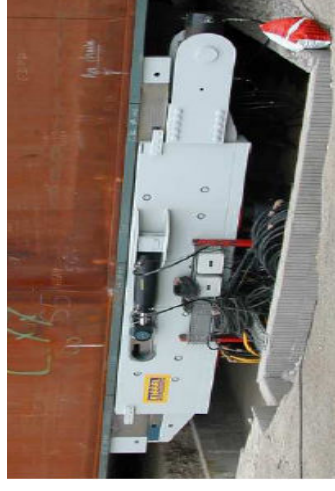
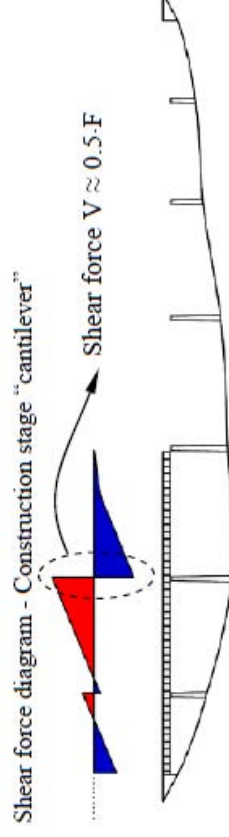
Problémafelvetés

1. Lokális, koncentrált erőbevezetés
↓
erőbevezetési hely folyamatosan változik
↓
Beroppanás !!!
↓
nincs szabványos méretezési eljárás



Cél: gyakorlatban használható, kísérleteken és végeeselemes számításokon alapuló méretezési eljárás kidolgozása.

2. Erőbevezetés külpontosságának vizsgálata
3. Egyidejű nyíró- és keresztirányú erő kölcsönhatása





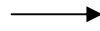
Kutatási stratégia

- szakirodalmi áttekintés
- korábbi kutatások áttekintése és új kutatási irányok meghatározása
- numerikus modell kidolgozása – verifikálása kísérletek alapján
- szerkezeti viselkedés vizsgálata
- kísérletek – virtuális kísérletek végrehajtása
- numerikus paramétervizsgálat
- méretezési módszer kidolgozása

Beroppanásvizsgálat

- 1, Szabványos méretezési eljárás nincs.
- 2, Kísérletek tisztán acél gerendákon:
 - 17 kísérlet: 6 db Aravena és Edlund (1987), 6 db Kähönen (1988), 5 db Elgaaly és Seshadri (1997).

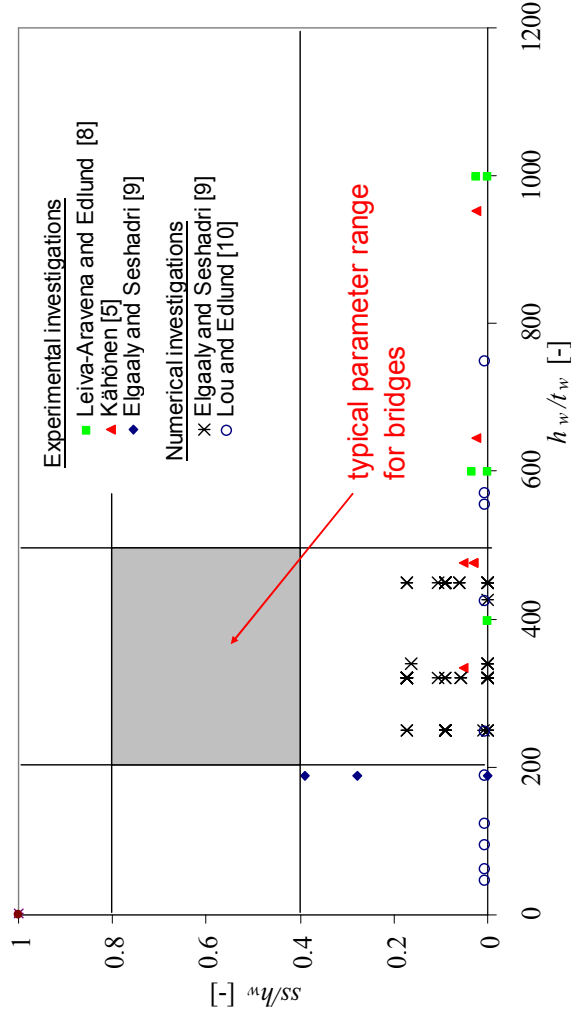
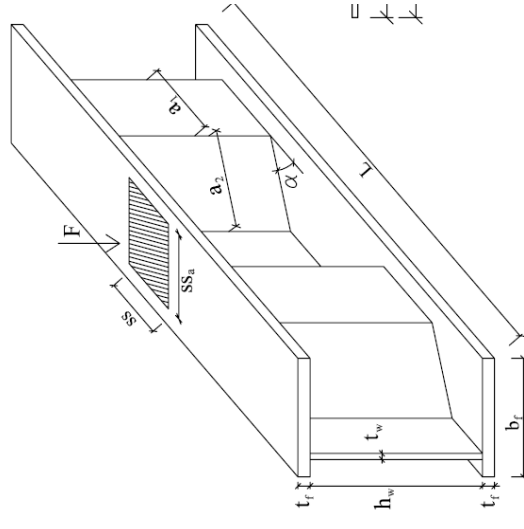
numerikus vizsgálatok: Elgaaly és Seshadri (1997)
Luo és Edlund (1996)



Céljuk: csarnokszerkezetek teherbírásának meghatározása koncentrált erőbevezetés alatt.

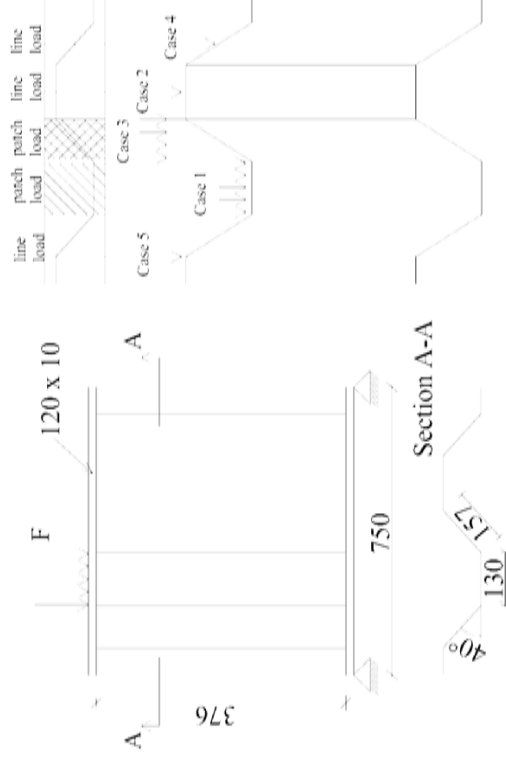


- Cél:**
- 1, Tipikus hídszerkezetre jellemző paramétertartomány vizsgálata.
 2. Szerkezeti viseelkedés vizsgálata.
 3. Méretezési eljárás kidolgozása.

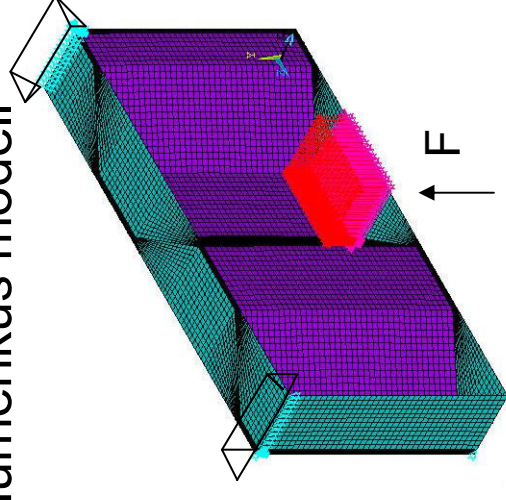


Numerikus modell kidolgozása

alapja: Elgaaly és Seshadri kísérletei

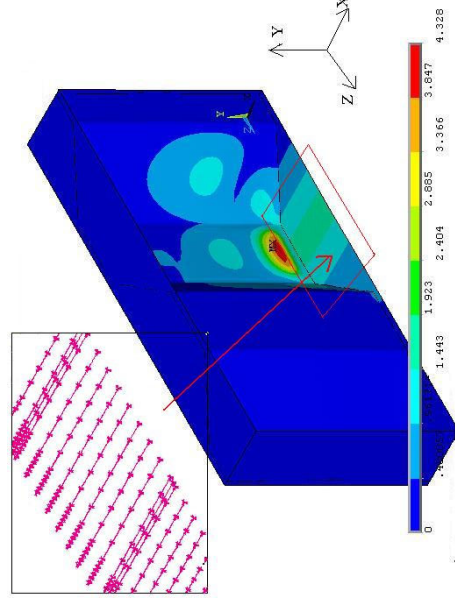


numerikus modell

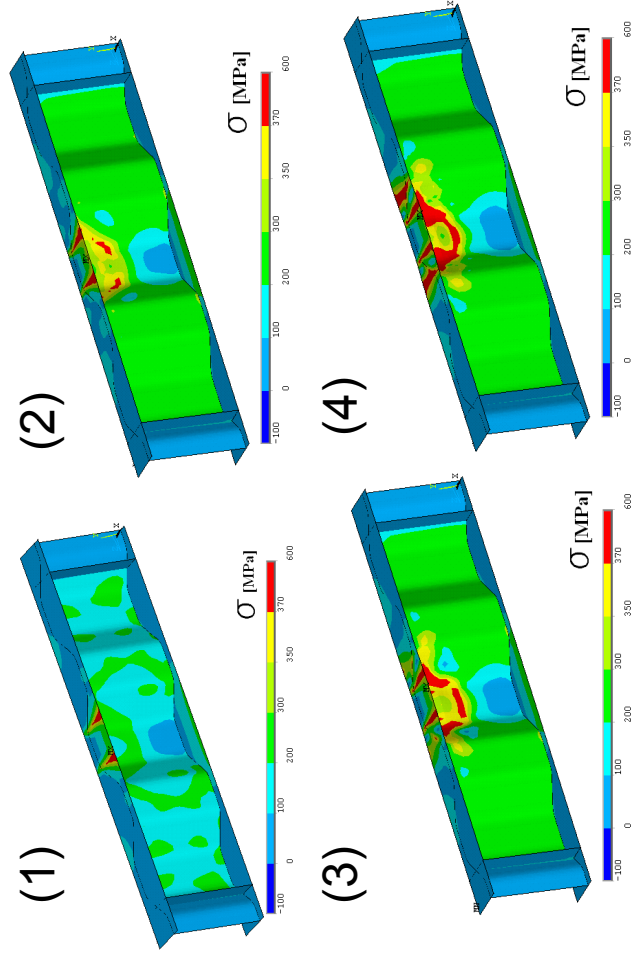
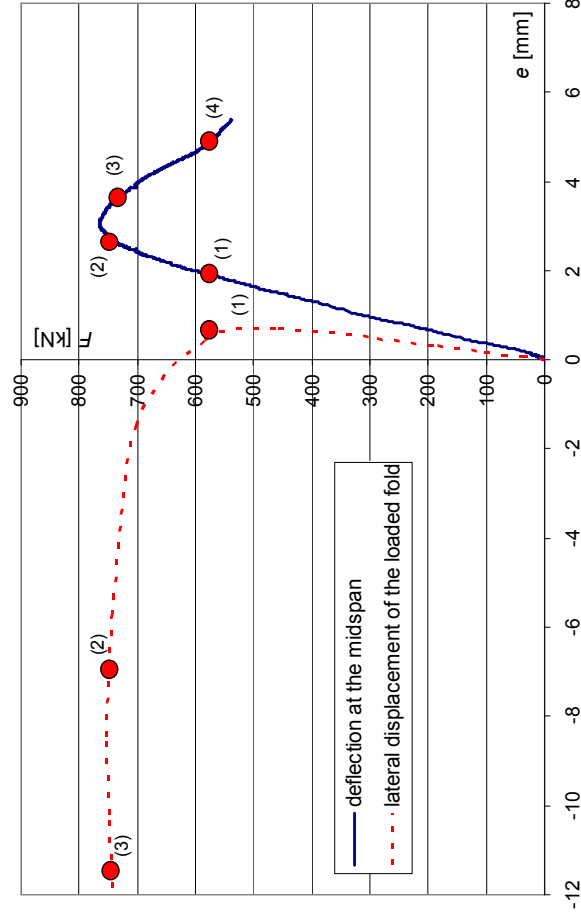


Modell verifikáció

Próbatest	$F_{R,exp}$	$F_{R,num}$	$F_{R,num}/F_{R,exp}$
1	131.28	122.81	0.935
2	82.33	79.74	0.969
3	102.35	99.79	0.975
4	95.68	87.36	0.913
5	73.43	100.73	1.372

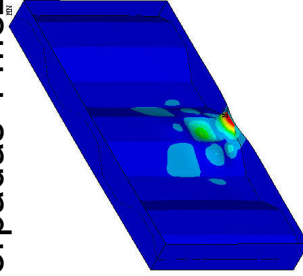


Szerkezeti viselkedés

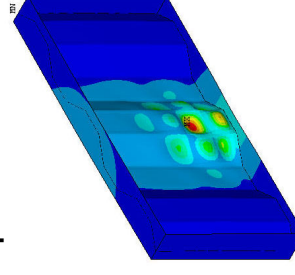


Jellemző tönkremeneteli módok

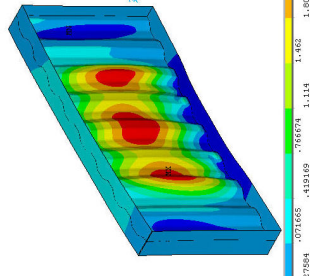
lokális horpadás 1 mezőben



lokális horpadás több mezőben



globális horpadás

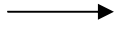




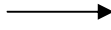
Numerikus paramétervizsgálat

Vizsgált paraméterek

- 1, hajlítási szög: $\alpha = 15^\circ - 30^\circ - 45^\circ - 65^\circ$
- 2, gerincmező oldalaránya: $h_w/t_w = 200 - 300 - 400 - 500$
- 3, lemezmező oldalaránya: $a_1/t_w = 12,5 - 25 - 50 - 75 - 100 - 117$
- 4, erőbevezetési hossz: $ss/h_w = 0,4 - 0,5 - 0,6 - 0,7 - 0,8$
- 5, övszélesség: $b_f = 150 - 300 - 400 - 500\text{mm}$
- 6, övvastagság: $t_f = 20 - 30 - 40 - 60 - 80 - 100\text{mm}$



paraméterek teherbírást befolyásoló hatásának meghatározása



méretezési eljárás

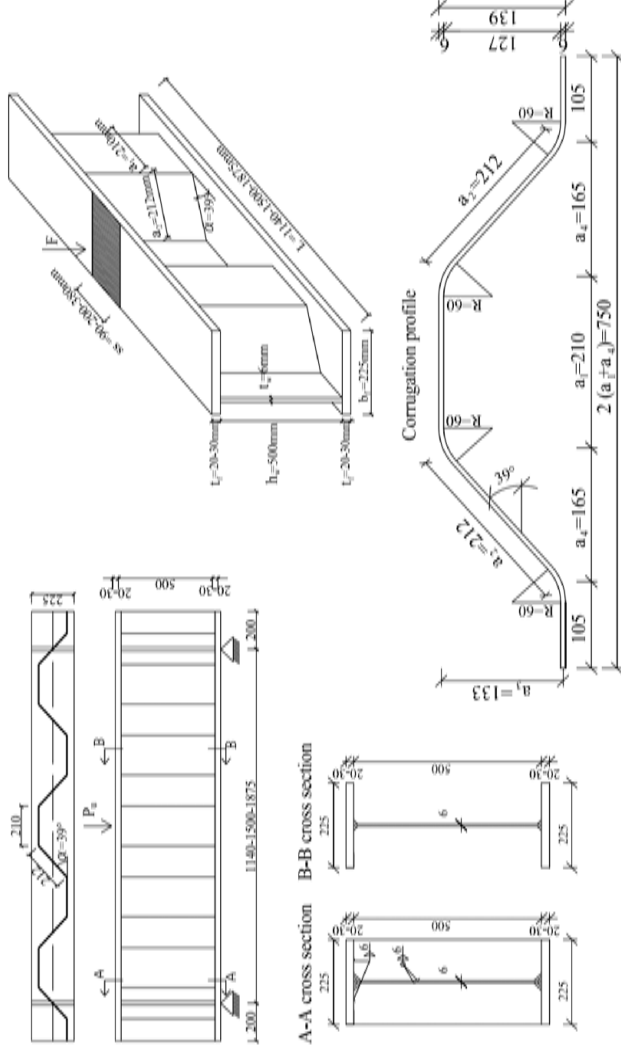
Kísérleti program

Kísérleti program: 12 próbatest vizsgálata

Kísérletek célja:

1. Beroppanási ellenállás meghatározása tipikus hídszerkezetre jellemző geometriájú próbatesten.
2. Szerkezeti viselkedés vizsgálata különböző kísérleti elrendezésekben.
3. Korábban kidolgozott méretezési eljárás verifikálása, továbbfejlesztése.

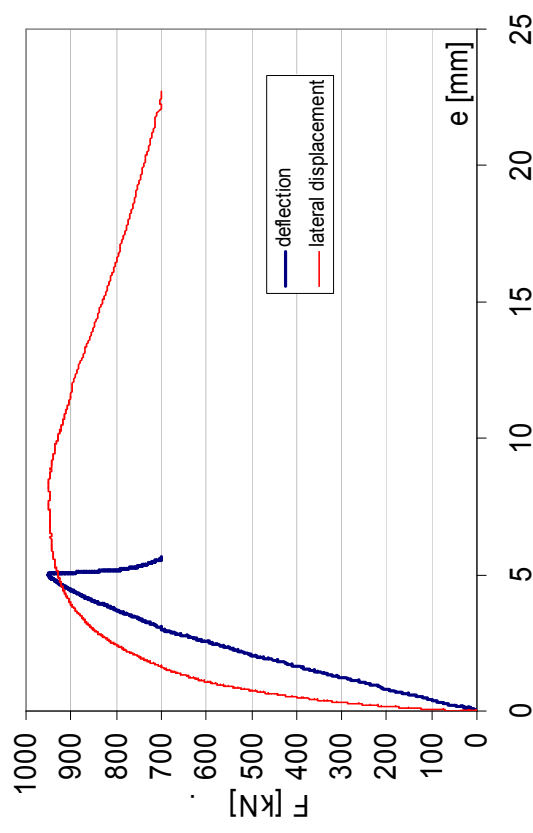
Kísérleti elrendezés és a vizsgált próbatest



Kísérleti program

- Kísérleti program:
1. terhelt mező vizsgálata (párhuzamos, ferde, kettő találkozása),
 2. erőbevezetési hossz vizsgálata (90, 200, 380 mm),
 3. feszítáv vizsgálata (1140, 1500, 1875 mm),
 4. övvastagság vizsgálata (20, 30 mm),
 5. erőbevezetés külpontosságának vizsgálata.

Tönkremeneteli mód:





Eredmények értékelése

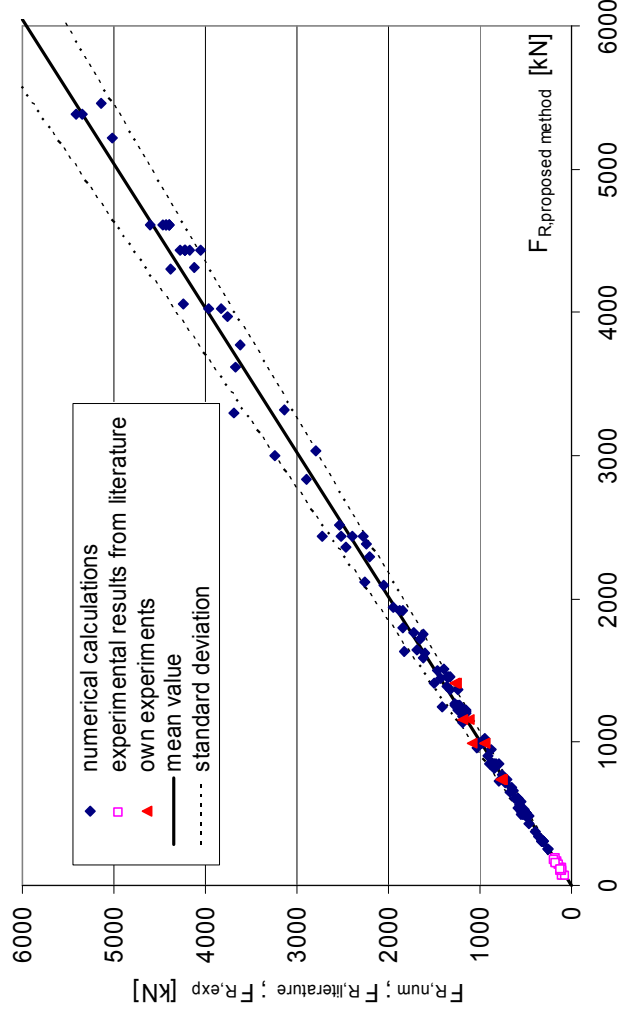
1. Vizsgált paraméterek teherbírást befolyásoló hatásnak meghatározása.
2. Méretezési módszer verifikálása, továbbfejlesztése.

Beroppanási ellenállás: $F_R = (F_{R,w} + F_{R,\beta})$

gerinc ellenállása: $F_{R,w} = \chi \cdot t_w \cdot f_{yw} \cdot SS \cdot k_\alpha$

övlemez ellenállása: $F_{R,\beta} = 2 \cdot \sqrt{n \cdot M_{pl,f} \cdot \chi \cdot t_w \cdot f_{yw}}$

t_f/t_w	n
$t_f/t_w < 4$	4
$4 \leq t_f/t_w \leq 7$	3
$7 < t_f/t_w$	2

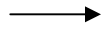


Geometriai helyettesítő imperfekció

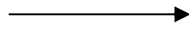
Cél: felületszerkezeti modell segítségével a tervezési ellenállás értékének meghatározása.



Kulcskérdés: helyettesítő geometriai imperfekció felvétele.



Nincs szabványos ajánlás az EC3-ban trapézlemez gerincű tartókra.



EC3-1-5 ajánlásai →

Kísérletek alapján ajánlás kidolgozása a geometriai helyettesítő imperfekcióra.

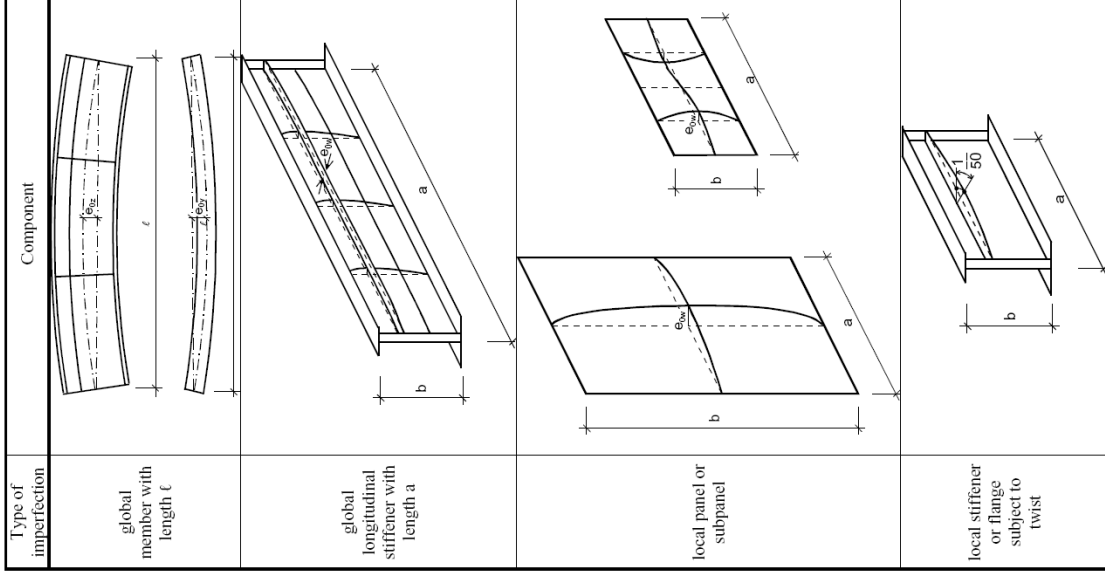
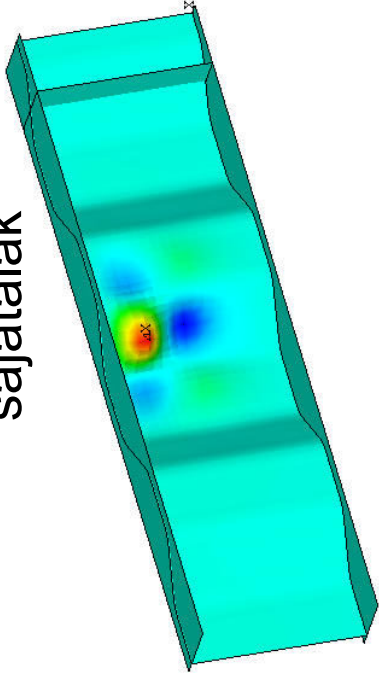


Figure C.1: Modelling of equivalent geometric imperfections

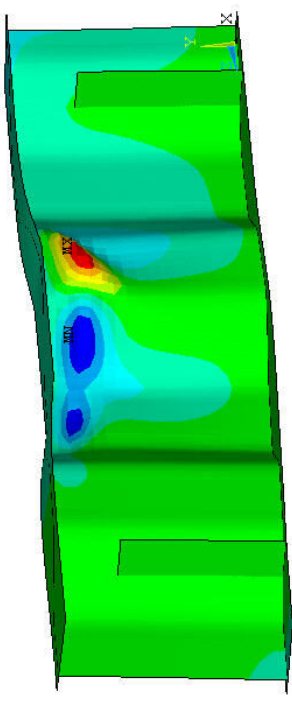


Vizsgált imperfekciós alakok

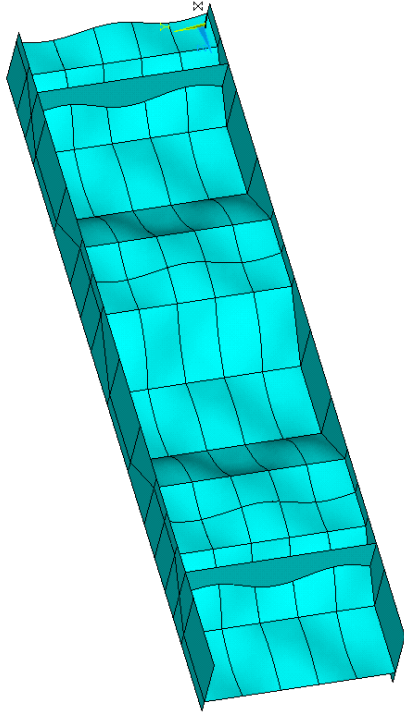
1. Lokális horpadáshoz tartozó sajáतालak



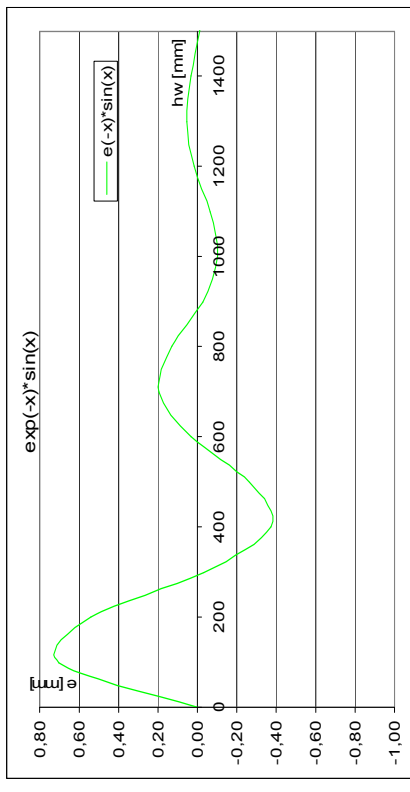
2. Tönkremeneteli alak



3. Szinusz hullám alakú imperfekció az EC3 modellje alapján



4. Ajánlott imperfekciós alak az első sajáतालak numerikus közelítésére

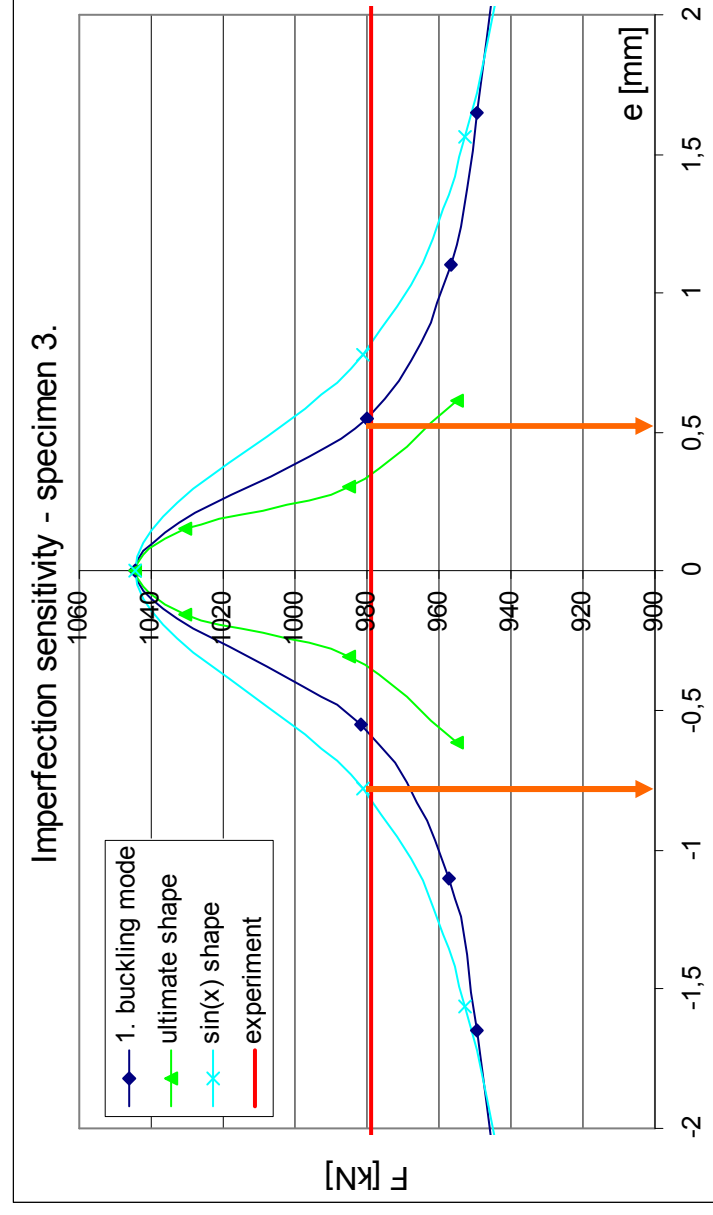


$$f(x) = e^{-\frac{x}{h_w} \cdot m} \cdot \sin\left(\frac{1}{h_w} \cdot k \cdot \pi \cdot x\right)$$

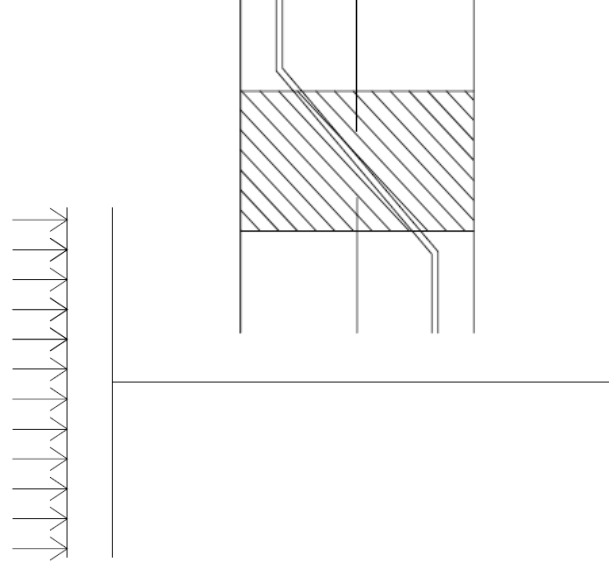
Imperfekció nagyságának meghatározása

- Amplitúdó meghatározása:
1. Sajátalak formájú,
 2. tönkremeneteli alak formájú,
 3. EC3 szerinti $\sin(x)$ alakú imperfekcióhoz.

Kísérleti háttér: \longrightarrow Imperfekció érzékenységi vizsgálat mindhárom imperfekciós alak alkalmazásával.

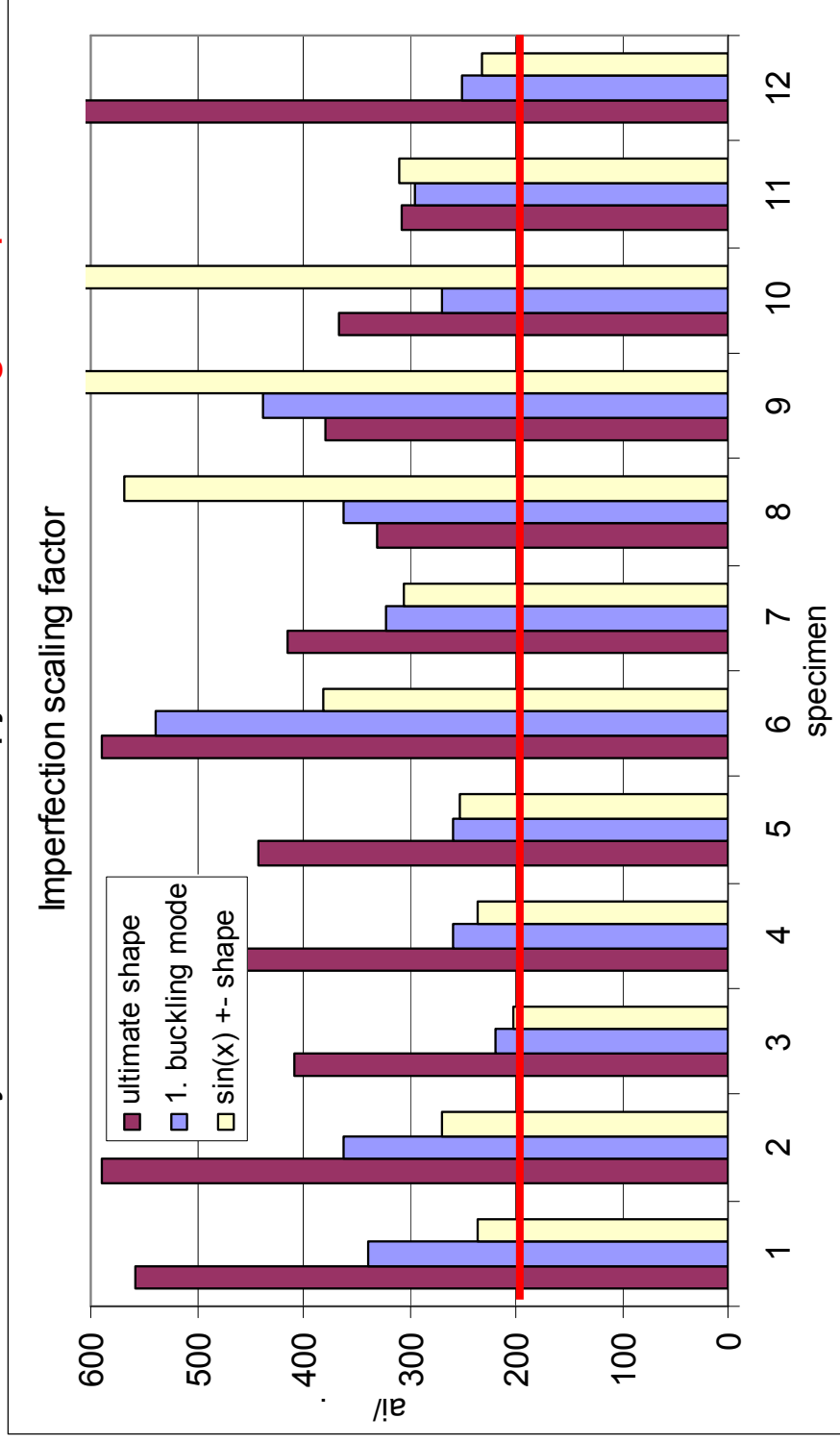


Ferde lemezmező
terhelt



Imperfekció nagyságának meghatározása

Összes kísérleti eredmény kiértékelése alapján → **szükséges imperfekció nagyság**



Ajánlás az alkalmazandó imperfekció nagyságára:

sin(x) imperfekció esetén: $a_i/200$

sajátalak formájú imperfekció esetén: $a_i/200$

Erőbevezetés szélességének és külpontosságának hatása

Külpontosság hatásának vizsgálata



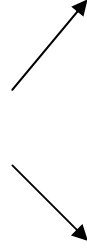
Erőbevezetés szélessége kisebb,
mint az övszélesség.



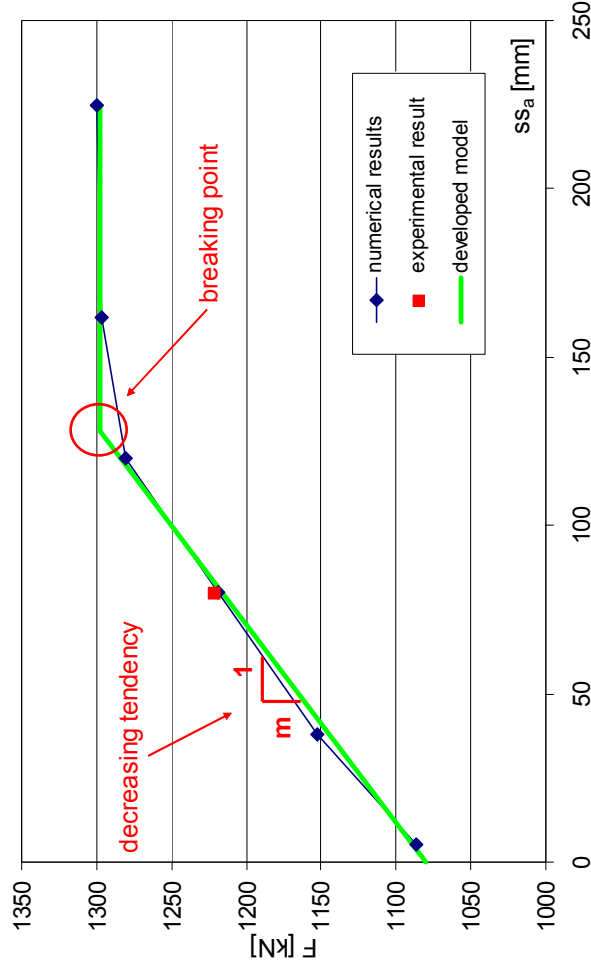
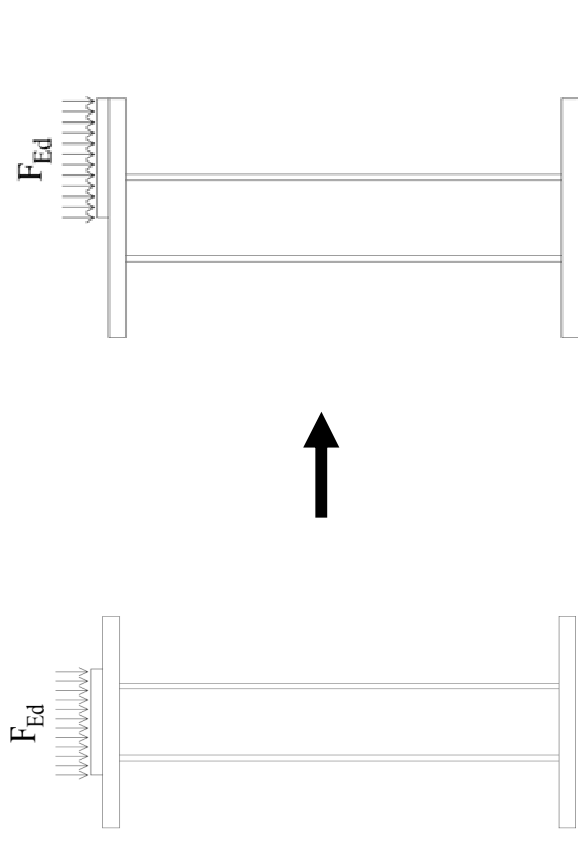
Centrikus esetben ez önmagában már
teherbíráscsökkenést okoz.



Külpontosság további teherbíráscsökkenést eredményez.

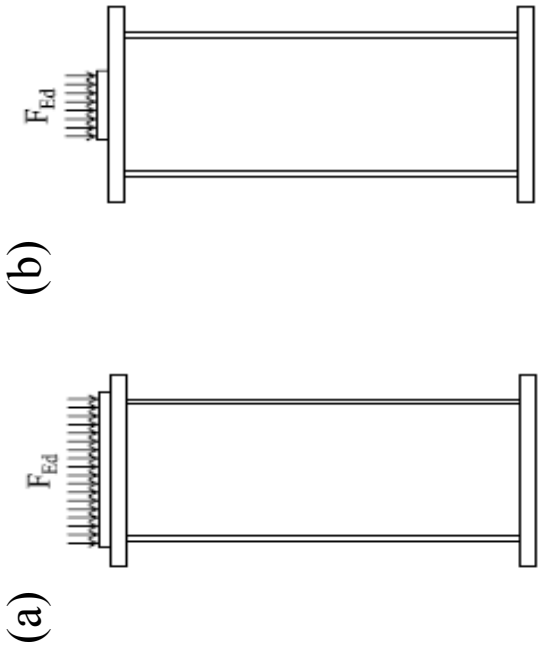
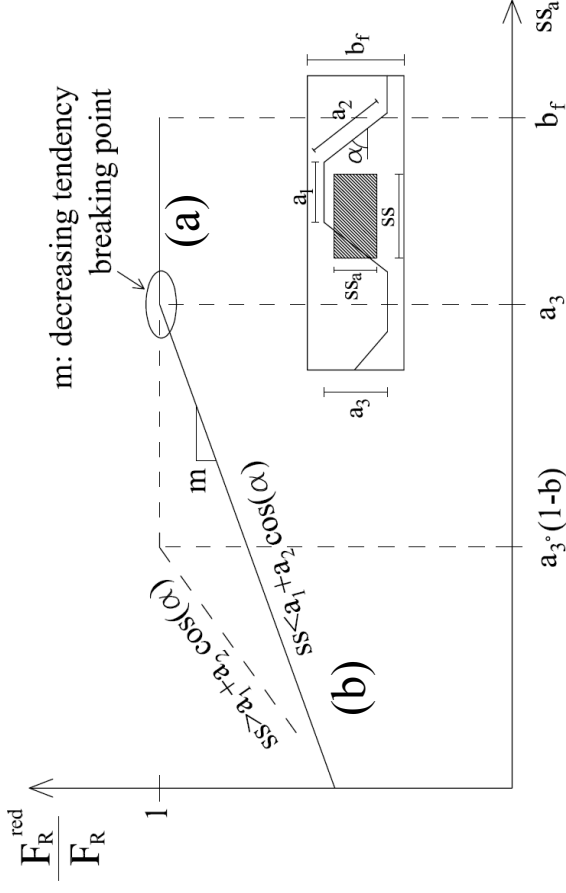


Erőbevezetési szélesség hatásának vizsgálata
Külpontosság hatásának vizsgálata



Erőbevezetés szélességének hatása

Viselkedés modellje:



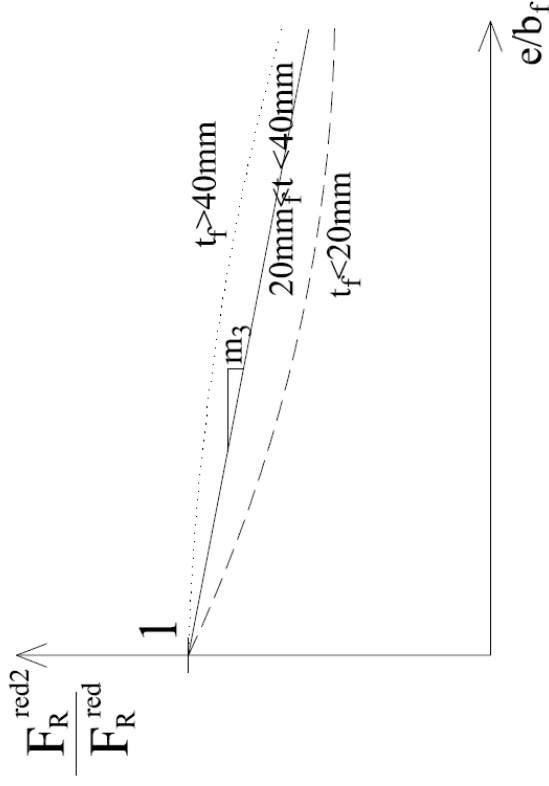
Méretezési eljárás:

$$F_R^{red} = F_R \cdot \{1 - m[a_3 \cdot (1 - b) - SS_a]\}$$

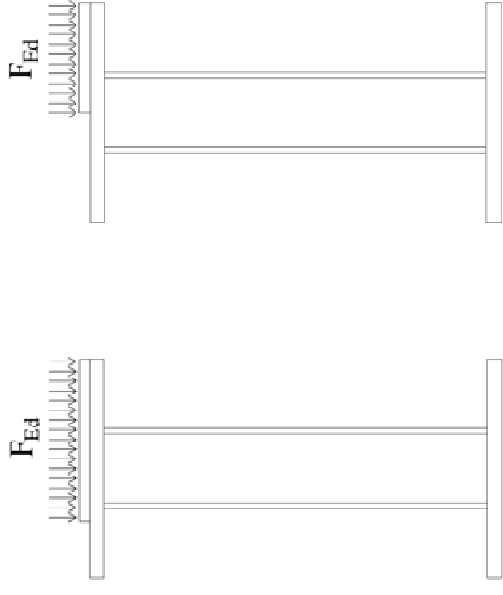
- F_R beroppanás ellenállás, ha a teljes öv terhelt,
- m teherbíráscsökkenés mértéke,
- SS_a erőbevezetés szélessége,
- $a_3(1-b)$ az a pont, ameddig nincs teherbíráscsökkentő hatása az erőbevezetés szélesség csökkenésének.

Erőbevezetés külpontosságának hatása

Viselkedés modellje:



Széles – keskeny erőbevezetés:



Méretezési eljárás:

$$F_R^{red2} = F_R^{red} \cdot \left(1 - m_3 \cdot \frac{e}{b_f} \right)$$

F_R^{red}

beroppanás ellenállás az teher szélesség figyelembe vételével,

m_3 teherbíráscsökkenés mértéke,

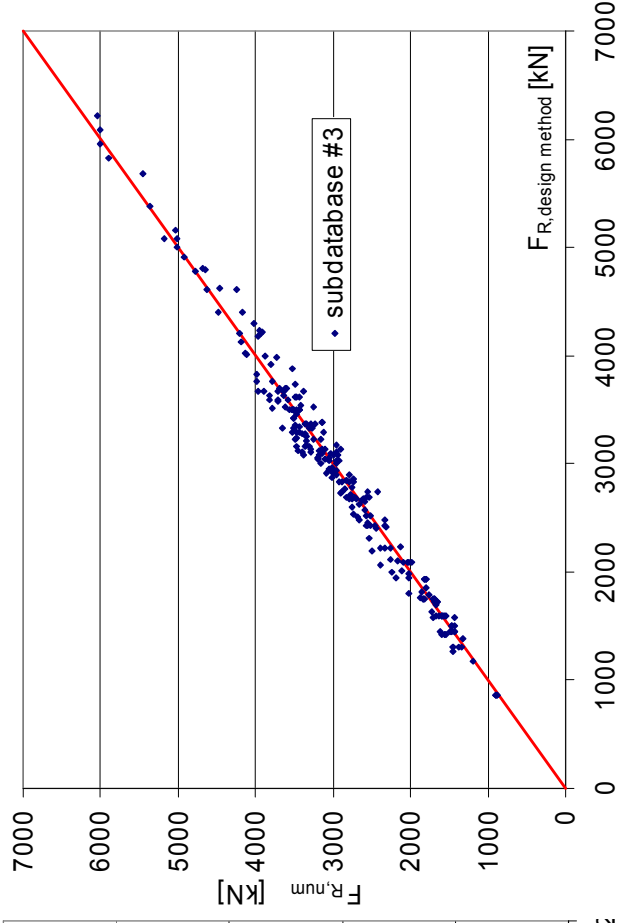
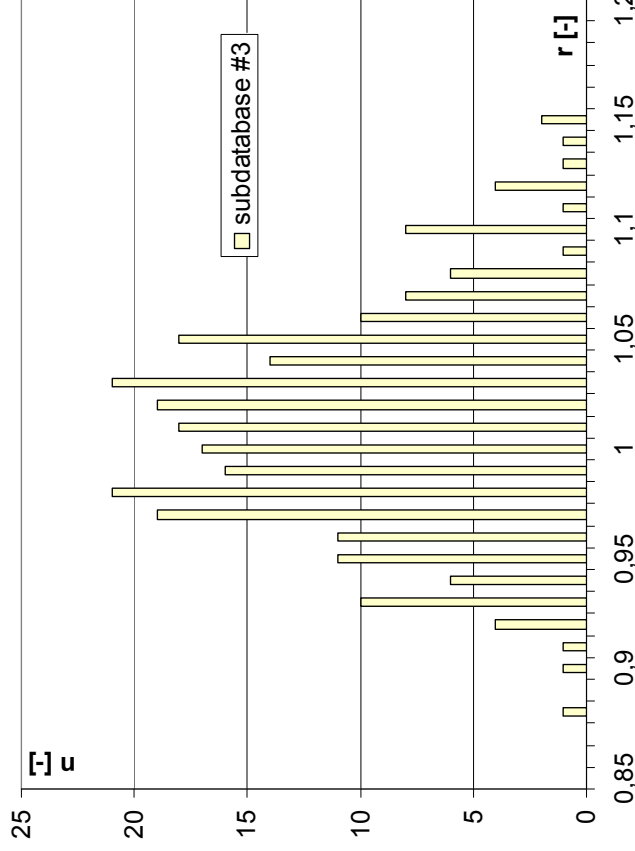
e/b_f külpontosság nagysága.



Parciális tényező meghatározása

3 méretezési módszer \rightarrow 3 parciális tényező

Statistikai kiértékelés:



γ_{M1}



Parciális tényező meghatározása

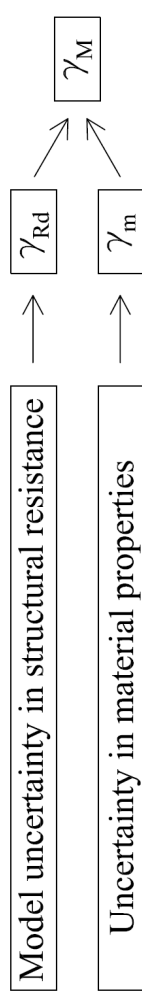
EN1990 tartalmaz erre vonatkozóan ajánlást, ha az méretezési eljárási kísérletek alapján lett kidolgozva.



Mivel a méretezési eljárás nagyrészt numerikus szimuláción alapszik, ezt figyelembe vettem a parciális tényező meghatározásánál.



1. Anyag- és számítási modell bizonytalanságának szétválasztása.



2. Numerikus modell bizonytalanságának figyelembe vétele.

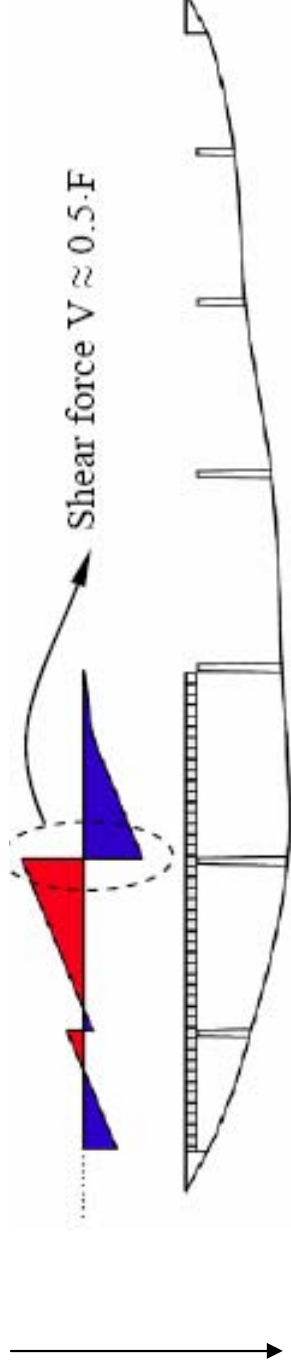
$$V_r^2 = (V_\delta^2 + 1) \cdot \left[\prod_{i=1}^n (V_{Xi}^2 + 1) \right] \cdot (V_{FEM}^2 + 1) - 1$$

3. Geometriai bizonytalanság figyelembe vétele.

$$V_r^2 = (V_\delta^2 + 1) \cdot (V_{geom1}^2 + 1) \cdot (V_{geom2}^2 + 1) \cdot (V_{FEM}^2 + 1) - 1$$

F+V kölcsönhatásának vizsgálata

Gyakorlatban, főleg betolással épülő hidaknál gondot okozhat nagy nyíró- (V) és keresztirányú koncentrált erő (F) egyidejű jelenléte.



Tervezésben figyelembe kéne venni.

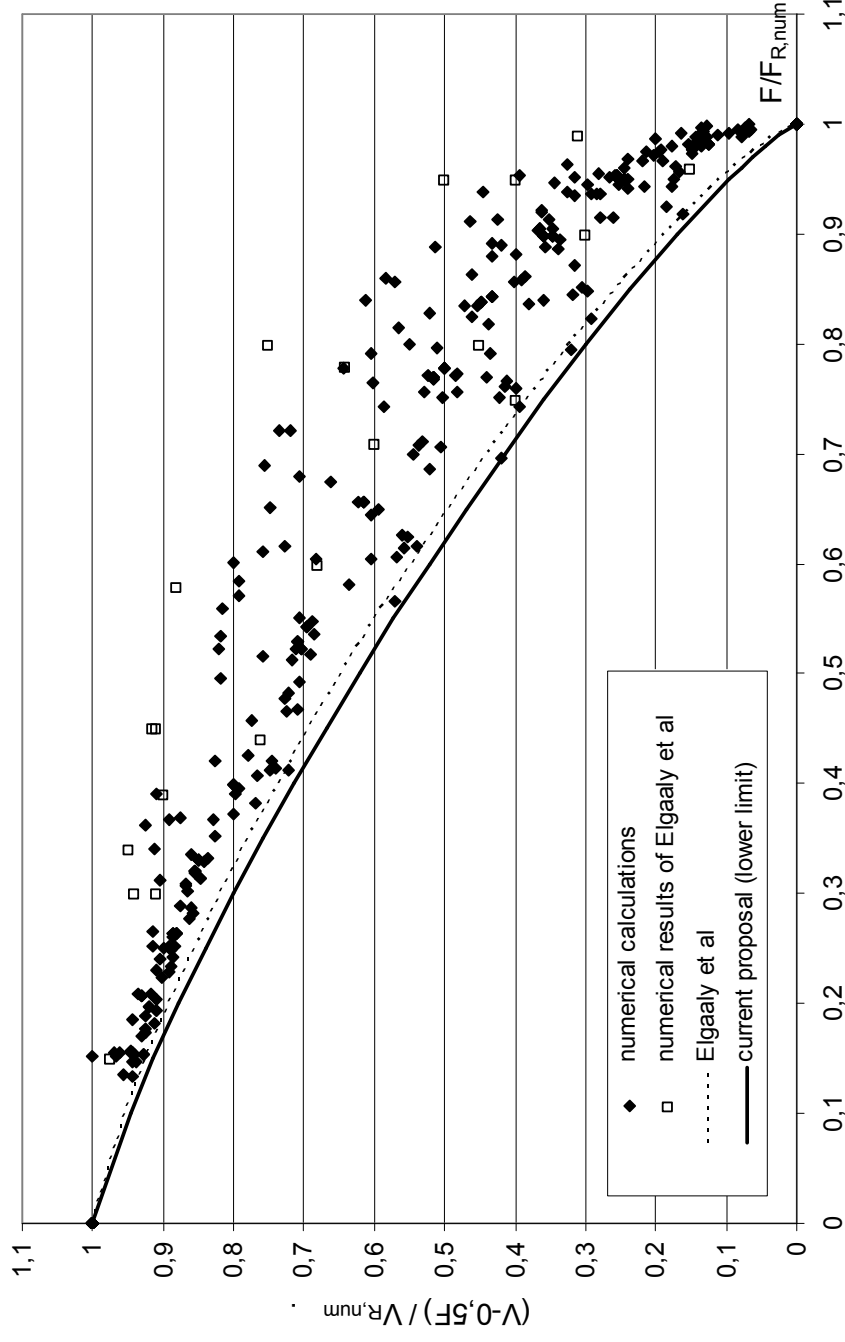
1. EC3-ban nincs ajánlás keresztirányú- és nyíróerő interakciójának figyelembe vételére.
2. Szakirodalomban nagyon kis számú kutatás található, főleg trapézgerincű tartók esetére.



Cél: Új (F+V) interakciós képlet kidolgozása trapézgerincű tartókra.

F+V kölcsönhatásának vizsgálata

Numerikus eredmények kiértékelése (hatások szeparálásával)



1. ajánlott interakciós képlet:

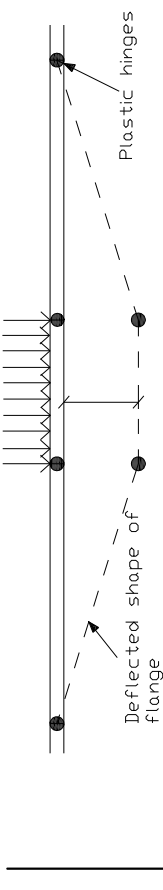
$$\left(\frac{V - 0.5 \cdot F}{V_R} \right)^{1.2} + \left(\frac{F}{F_R} \right)^{1.2} \leq 1.0$$

F+V kölcsönhatásának vizsgálata

Nyírási ellenállás → Gerinc ellenállása a domináns

Beroppanási ellenállás → - Gerinc ellenállása

- Övlemez ellenállása



szintén domináns lehet

Ha az öv ellenállás domináns → gerinc kevésbé dolgozik beroppanás ellen

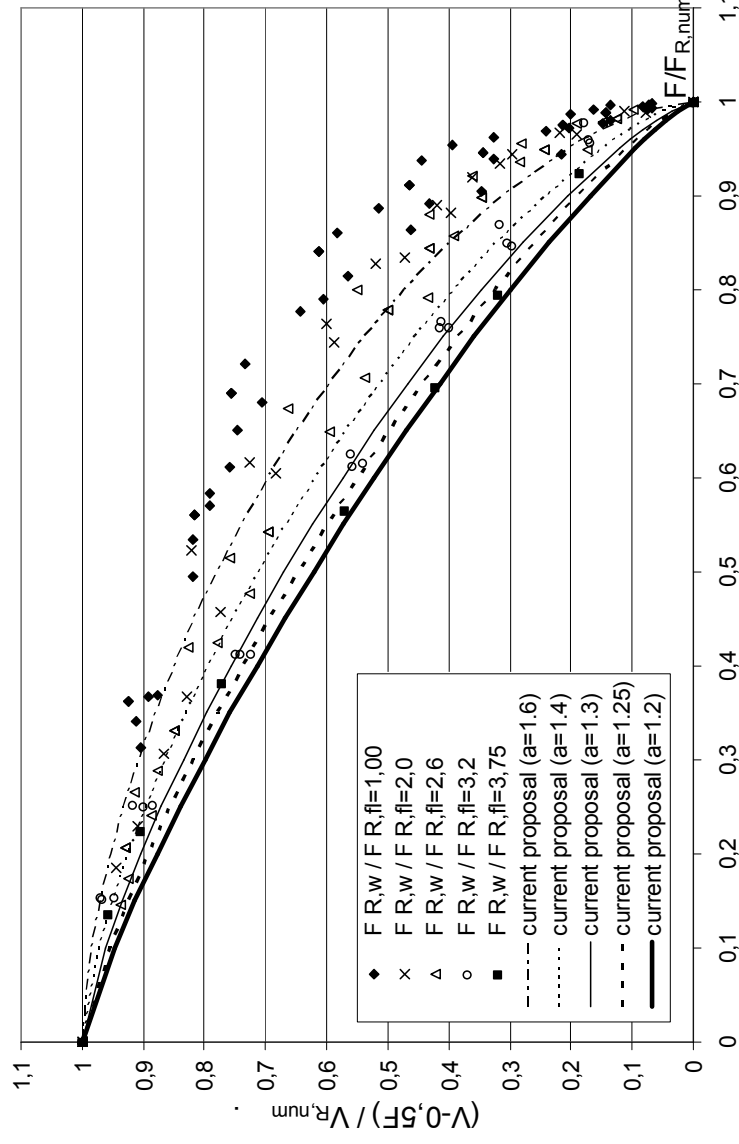
Következtetés:
Interakció hatása kifejezhető a beroppanási ellenállásban a gerinc és öv ellenállásainak arányával.

nyírási ellenállás nagyobb lesz

Interakció hatása csökken



F+V kölcsönhatásának vizsgálata

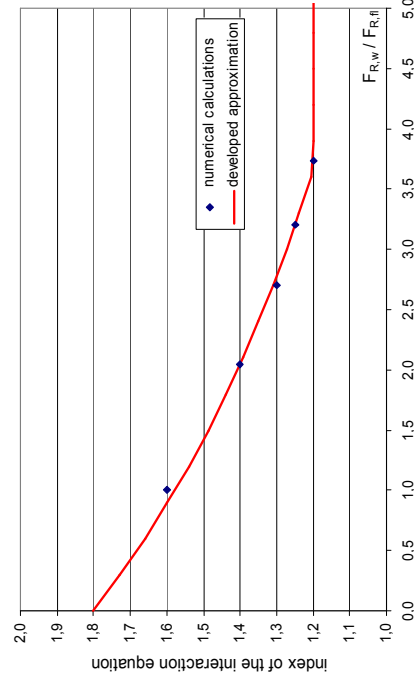


ajánlott interakciós görbe:

$$\left(\frac{V - 0.5 \cdot F}{V_R} \right)^a + \left(\frac{F}{F_R} \right)^a \leq 1.0$$

kitevő meghatározása:

$$a = e^{-0.25 \cdot \left(\frac{F_{R,w}}{F_{R,fl}} \right) + 0.8} \quad \text{de} \quad a > 1.2$$





1. tézis

Meghatároztam azokat a geometriai paramétereket, melyek befolyásolják a trapézgerincű tartók beroppanási ellenállását és meghatároztam ezek hatását a szerkezeti viselkedésre nemlineáris végeelemes analízis alapján.

- a, Kidolgoztam egy adatbázist, mely a trapézgerincű tartók beroppanási ellenállási értékeit tartalmazza a hídszerkezetekre jellemző paraméter-tartományban.
- b, **Meghatároztam a keresztirányú erő hatására létrejövő lehetséges tönkremeneteli módokat, mely lehet az egyes lemezmezők lokális horpadása, valamint a teljes gerinclemez globális horpadása.**
- c, **Meghatároztam a beroppanási ellenállás és a vizsgált paraméterek közötti összefüggéseket, ha a tönkremenetel módja a gerinclemez lokális horpadása. A vizsgált paraméterek az erőbevezetési hossz, a lemezmező szélesség/vastagság aránya, a hajlítási szög, az övlemez szélessége és vastagsága, valamint az erőbevezetés szélessége és a külpontosság.**
- d, **Meghatároztam egy minimális teherelosztólemez méretet, mely alkalmazásával a hidak betolása közben a koncentrált erőbevezetés következtében a lokális keresztirányú övhajlítási tönkremenetelt el lehet kerülni.**

2. tézis

A trapézlemez gerincű tartók beroppanási ellenállásának meghatározására egy módosított méretezési eljárás lett kidolgozva a BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke és a Stuttgarteri Egyetem Konstruktion und Entwurf Tanszékének együttműködésében. A méretezési eljárás szakirodalmi kísérleteken és a kísérletek által verifikált numerikus számítások alapján lett kidolgozva. A tézis a témakörben elvégzett saját kutatási eredményeket foglalja össze.

- a, **Megvizsgáltam** és elemeztem a korábban kidolgozott **trapézgerincű tartók beroppanási ellenállását meghatározó méretezési eljárásokat**, és megállapítottam, hogy Kähönen méretezési eljárása adja a legjobb eredményt a vizsgált paramétertartományban, ha a tönkremeneteli mód a gerinclemez lokális horpadása.
- b, **Kiegészítettem a méretezési módszert az erőbevezetési szélesség teherbírást befolyásoló hatásának, valamint az erőbevezetés külpontosságából származó teherbíráscsökkenés figyelembe vételével.**
- d, **A méretezési eljárás eredményeit statisztikailag kiértékeltem és meghatároztam az alkalmazandó parciális tényező értékét az ellenállás tervezési szintjének meghatározásához.**



3. tézis

Megterveztem és végrehajtottam egy kísérleti programot trapézlemez gerincű tartók beroppanási ellenállásának meghatározására 12 nagy léptékű próbatesten.

- a, **Meghatároztam és jellemeztem a kísérletben tapasztalt tönkremeneteli módokat és szerkezeti viselkedéseket a vizsgált paraméterek függvényében.**
- b, **Megállapítottam, hogy a beroppanási ellenállásban az övlemez ellenállása függ az öv- és gerinclemez vastagságának arányától (t/t_w) is, és a köztük lévő összefüggést meghatároztam.**
- c, **A kísérletek alapján a Braun és Kuhmann által kidolgozott méretezési eljárást pontosítottam.**



4. tézis

Kidolgoztam egy végeelem alapú méretezési eljárást trapézgerincű tartók beroppanási ellenállásának meghatározására.

- a, Meghatároztam a helyettesítő geometriai imperfekció hatását a szerkezeti viselkedésre (a merevségre, a beroppanási ellenállásra, a leszálló ágra, valamint a tönkremeneteli módra).
- b, Három különböző imperfekciós alakot vizsgáltam és meghatároztam a hatásukat a szerkezeti viselkedésre. Egy módosított alakot dolgoztam ki a helyettesítő geometriai imperfekció felvételére, mely a lokális horpadáshoz tartozó sajátalakon alapszik és zárt képlet formájában megadható.
- c, Az imperfekcióérzékenységi vizsgálat és a kísérleti eredmények alapján ajánlást dolgoztam ki a helyettesítő geometriai imperfekció nagyságának felvételére.



5. tézis

Interakciós görbét dolgoztam ki a koncentrált keresztirányú erő és nyíróerő kölcsönhatásának figyelembe vételére.

- a, Igazoltam, hogy az Elgaaly és Seshadri által kidolgozott ajánlás a nyírás és a koncentrált keresztirányú erő interakciójának figyelembe vételére egy jó közelítést ad egy, az általuk vizsgált paramétertartománynál sokkal szélesebb tartományban is.
- b, Kidolgoztam és bevezettem egy u.n. „mozgó” interakciós görbét, mely figyelembe veszi az interakciót befolyásoló geometriai paraméterek hatását és a tartó terhelési viszonyát, mely eredményeként gazdaságosabb tervezést tesz lehetővé.



További kutatási irányok

1. Hajlítás és keresztirányú erő kölcsönhatásának vizsgálata.
2. Szinuszhullám gerincű tartókra a kidolgozott eljárások alkalmazhatóságának vizsgálata.
3. Vasbeton övlemezek beroppanási ellenállást befolyásoló hatásának vizsgálata.



Köszönetnyilvánítás

Témavezetőimnek:

Dunai László

Ulrike Kuhlmann



Benjamin Braun

BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke dolgozói

Szerkezetvizsgáló Labor munkatársak

**Universität Stuttgart Konstruktion und Entwurf
Tanszékének dolgozói**



Köszönöm a figyelmet!