

Acélszerkezetek numerikus modellezése

EN 1993-1-14 szabvány alkalmazása



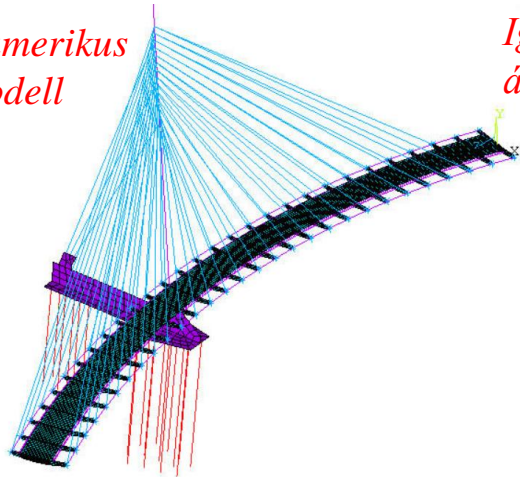
Tervezési mintapéldák

1. Rugalmas számítás, feszültségellenőrzés – feszültségkoncentráció vizsgálata
2. Képlékeny számítás – korlátolatlan folyás és képlékeny törés határállapota
3. Lemezes szerkezetek stabilitásvizsgálata
4. Fáradásvizsgálat

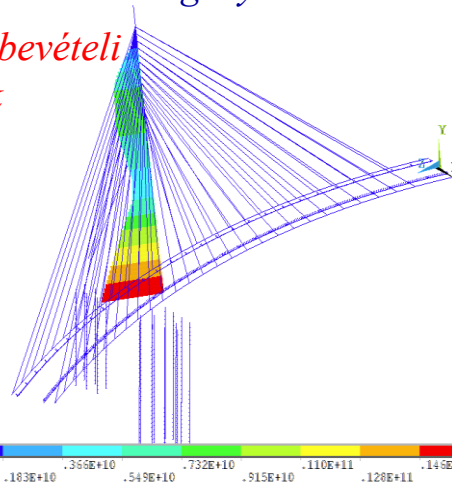
Méretezési modellszintek definíciója

Tervezési numerikus modellek

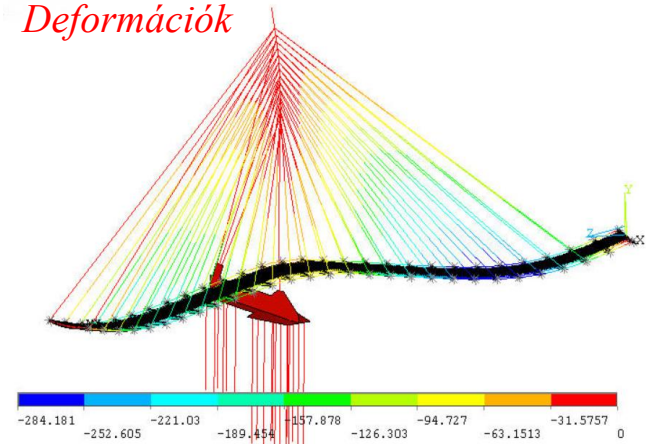
Numerikus modell



Igénybevételi ábrák



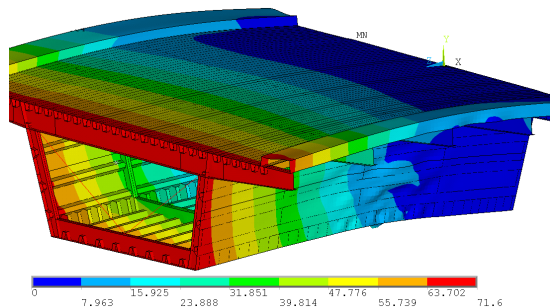
Deformációk



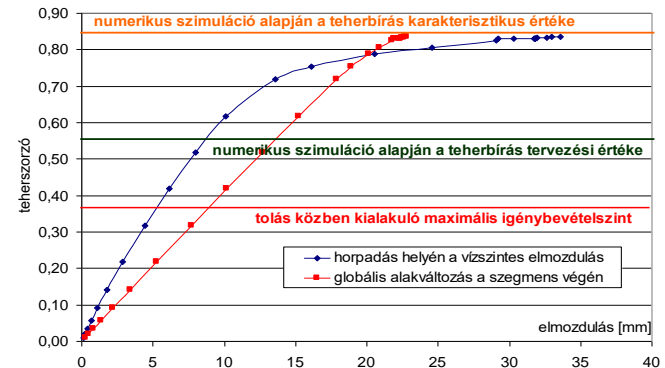
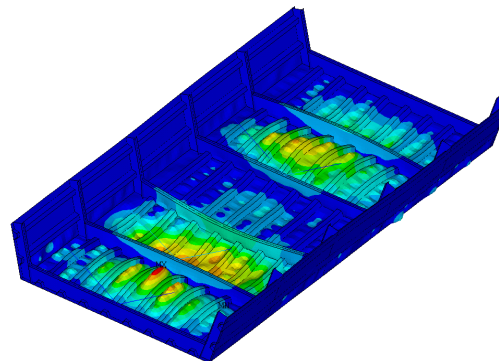
gyakorlati tervezés 99%-a

Közvetlen teherbírásvizsgálat / Numerikus szimuláció

Méretezés alapja közvetlen teherbírás meghatározás



Számítás végeredménye: erő-elmozdulás diagram

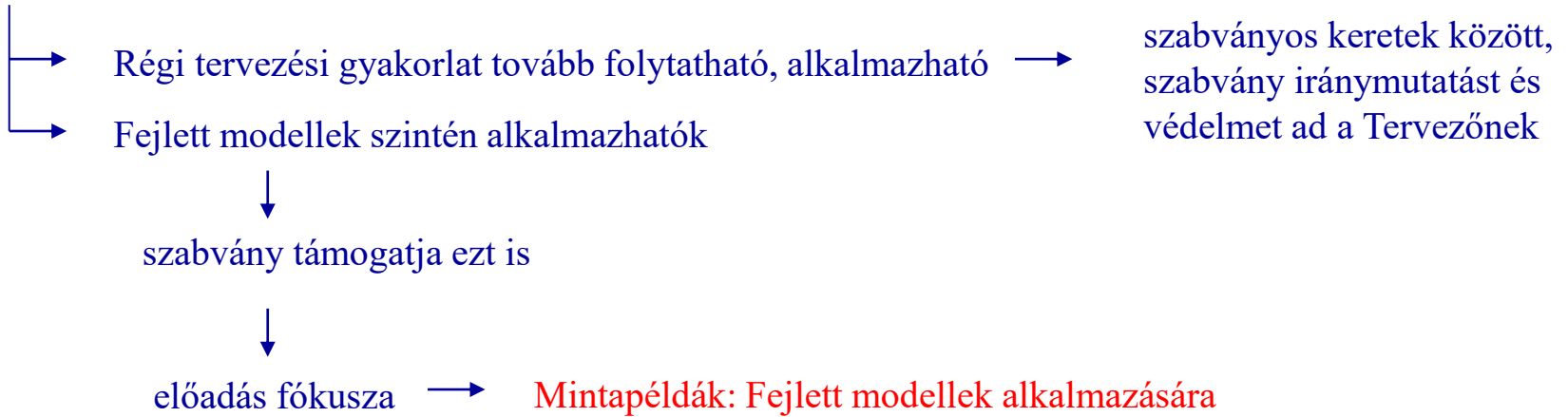


újtonság a szabványban

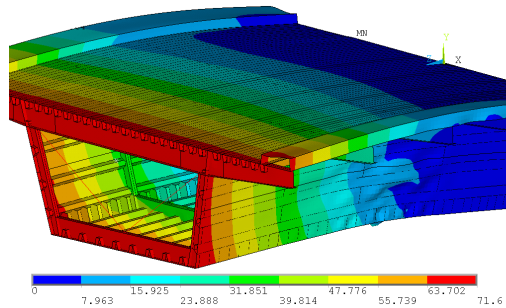
fejlett numerikus analízisek szabványosítása

Méretezési modellszintek definíciója

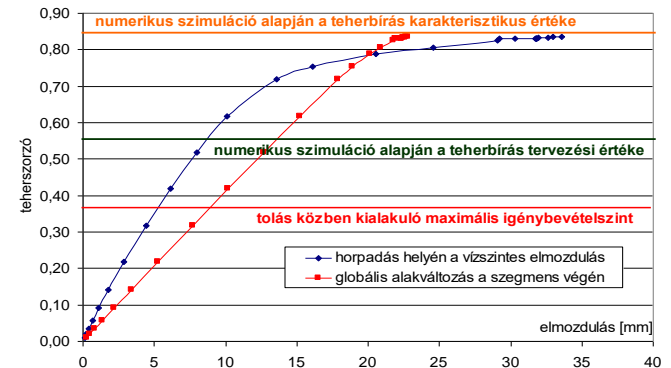
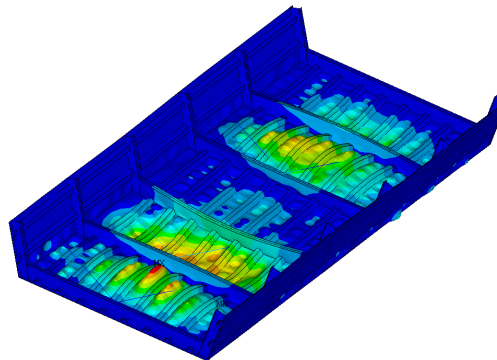
EN 1993-1-14 szabvány mindkét eljárást támogatja



Közvetlen teherbírásvizsgálat / Numerikus szimuláció → Méretezés alapja közvetlen teherbírás meghatározás



*Számítás végeredménye:
erő-elmozdulás diagram*



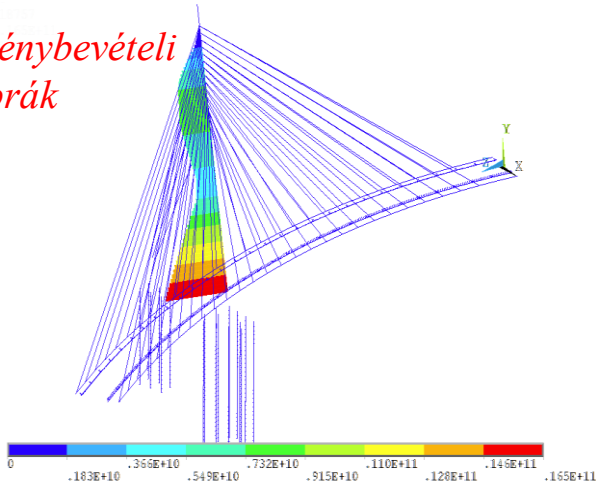
újdonosság a szabványban

fejlett numerikus analízisek szabványosítása

Méretezési modellszintek definíciója

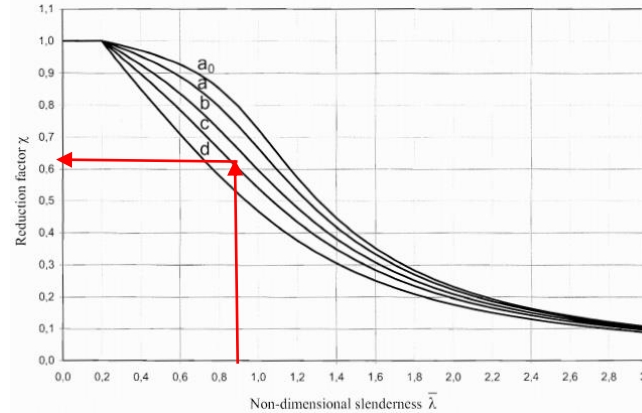
Tervezési numerikus modellek

Igénybevételi ábrák



Empirikus összefüggések

(gyártási sajátosságok, kísérleti bizonytalanságok)



Méretezési formulák

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1}$$

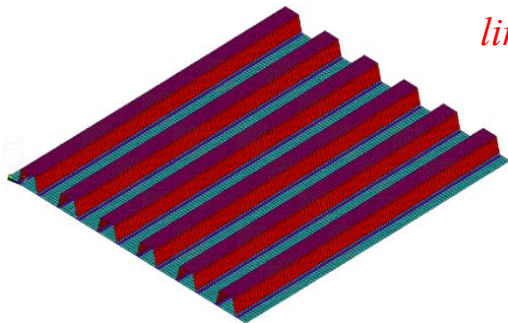
$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad \text{but } \chi \leq 1,0$$

$$\Phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right]$$

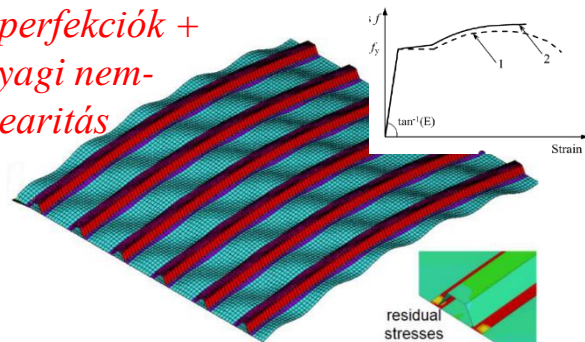
$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}$$

Közvetlen teherbírásvizsgálat / Numerikus szimuláció

Numerikus modell

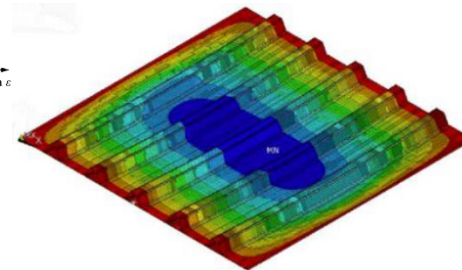


Imperfekciók +
anyagi nem-
linearitás



$$w(x, y) = A_{imp,g} \cdot \cos \frac{\pi \cdot x}{b} \cdot \sin \frac{\pi \cdot y}{a}$$

Tönkremeneteli alak



Erő-elmozdulás diagram

Ellenőrzés

$$R_{b,k} = \frac{R_{GMNIA}}{\gamma_{FE}}$$

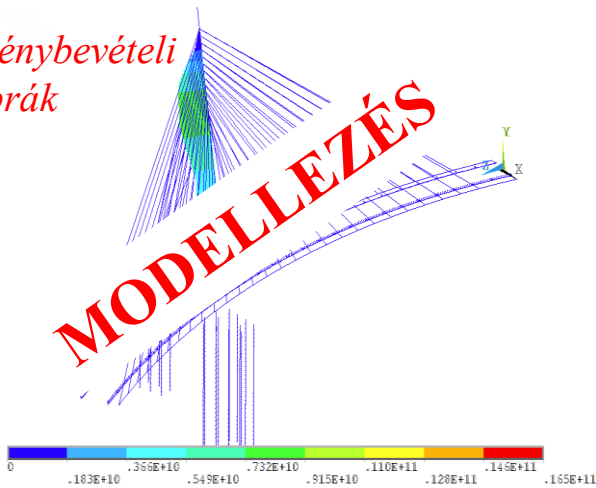
$$R_{b,d} = \frac{R_{b,k}}{\gamma_{M1}}$$

$$R_{b,Rd} \geq R_{b,Ed}$$

Méretezési modellszintek definíciója

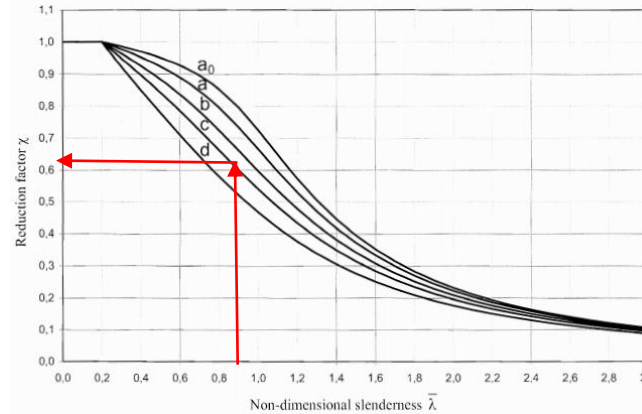
Tervezési numerikus modellek

Igénybevételi ábrák



Empirikus összefüggések

(gyártási sajátosságok, kísérleti bizonytalanságok)



Méretezési formulák

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1}$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad \text{but } \chi \leq 1,0$$

$$\Phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right]$$

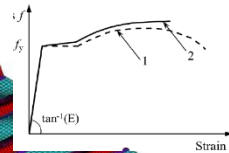
$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}$$

Közvetlen teherbírásvizsgálat / Numerikus szimuláció

Numerikus modell

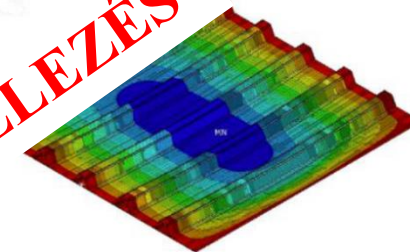
Imperfekciók +
anyagi n
linear

MODELLEZÉS



Tönkremeneteli alak

MODELLEZÉS



Erő-elmozdulás diagram

$$w(x, y) = A_{imp,g} \cdot \cos \frac{\pi \cdot x}{b} \cdot \sin \frac{\pi \cdot y}{a}$$

Ellenőrzés

$$R_{b,k} = \frac{R_{GMNIA}}{\gamma_{FE}}$$

$$R_{b,d} = \frac{R_{b,k}}{\gamma_{M1}}$$

$$R_{b,Rd} \geq R_{b,Ed}$$

Tervezési mintapéldák

1. Rugalmas számítás, feszültségellenőrzés – feszültségkoncentráció vizsgálata
2. Képlékeny számítás – korlátatlan folyás és képlékeny törés határállapota
3. Lemezes szerkezetek stabilitásvizsgálata
4. Fáradásvizsgálat

Feszültségkoncentráció figyelembe vétele

Hogyan kezeljük a feszültségkoncentrációt?

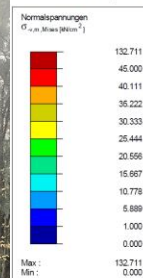
Héjmodellek hozománya – csatlakozási pontokban feszültségkoncentráció

Elhanyagolható?

Méretezendő rá a szerkezet?



EK12:
Flächen Spannungen Sigma-v,m,Mises

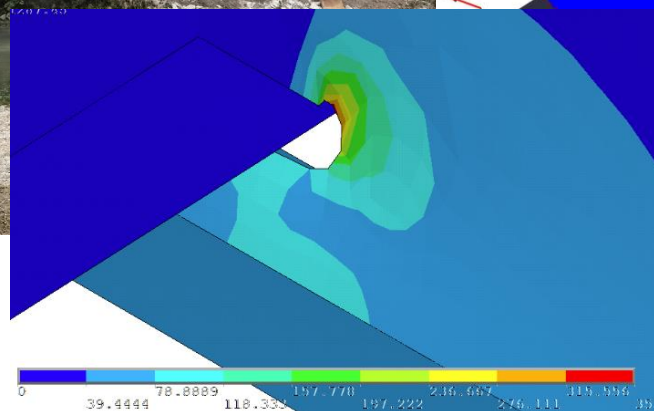


Spannungsspitze im Bereich der Kielsteife

Isometrie

Spannungsspitze

Max Sigma-v,m,Mises: 132.711, Min Sigma-v,m,Mises: 0.000 [kN/cm²]



BERGMEISTER
INGENIEURE

Feszültségkoncentráció figyelembe vétele

Fő kérdések: Hogyan vegyük figyelembe a numerikus számításokban?

- rugalmas számításban és ellenőrzésben

- képlékeny számításban és ellenőrzésben

Hogyan döntünk el, hogy megfelel-e a szerkezet a számított feszültségkoncentrációval?

Ajánlott számítási stratégia:

1. Feszültségkoncentráció szétválasztása:

-> **valós feszültségkoncentráció** -> **fizikai jelenség, minden szerkezetünkben jelen van**

-> **numerikus szingularitás** -> **numerikus számítási hiba**

-> numerikus modell éles sarkokkal/élekkel

-> numerikus modell lekerekített sarkokkal

2. Maximális képlékeny deformációk ellenőrzése – anyag határnyúlásával összehasonlítva

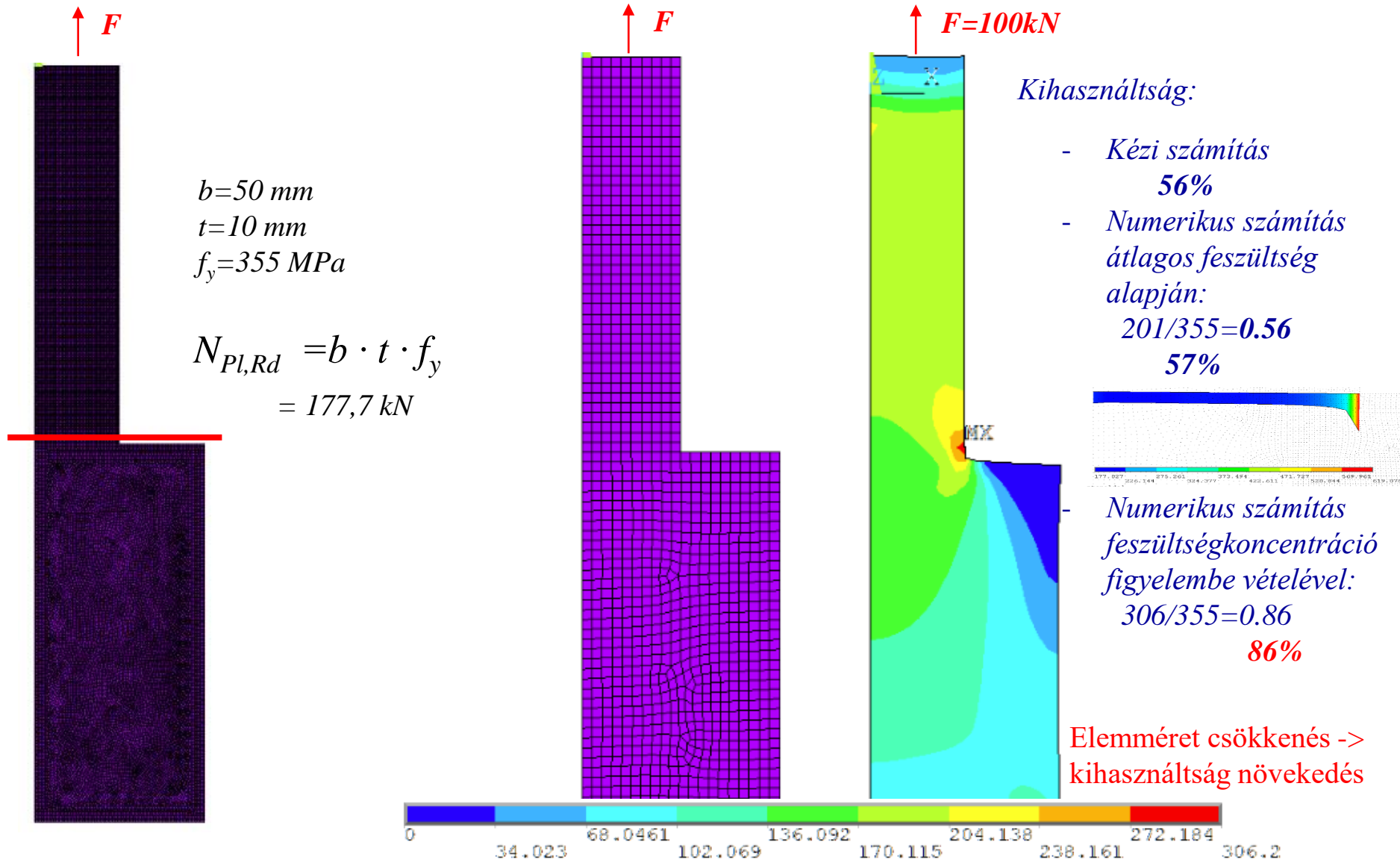
-> numerikus modell éles sarkokkal/élekkel

-> numerikus modell lekerekített sarkokkal

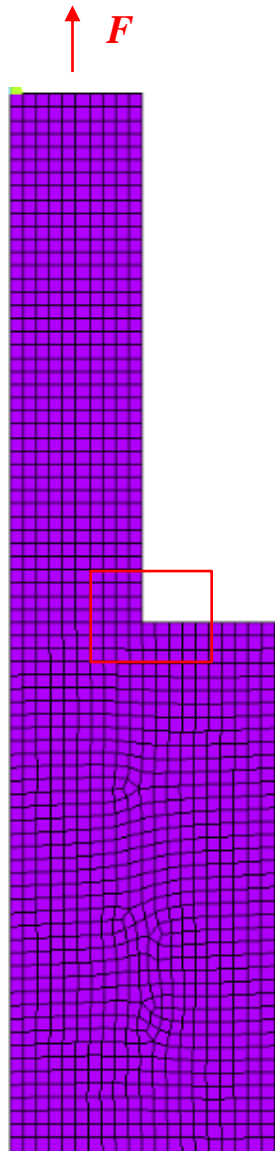
3. Első folyás határállapotának vizsgálata feszültségkoncentrációval

Anyagi lineáris / nem-lineáris számítás összehasonlítása

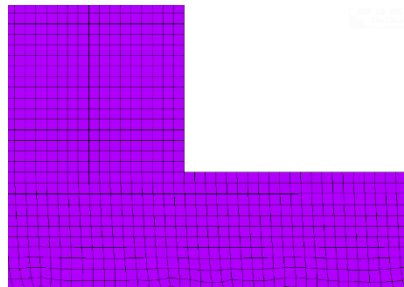
Egyszerű mintapélda – korlátozatlan folyás határállapota



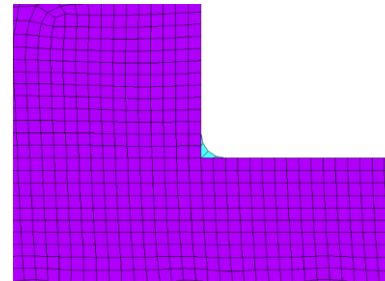
Modellek feszültségkoncentráció vizsgálatára



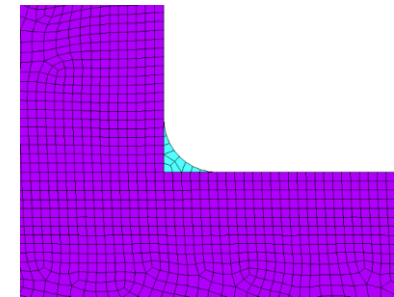
*Modell 1
éles sarok*



*Modell 2
lekerekítés $r=2\text{mm}$*

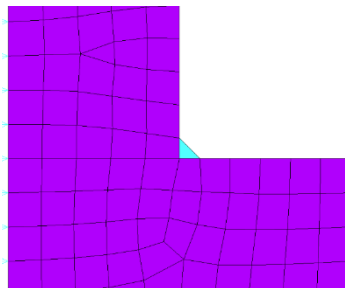


*Modell 3
lekerekítés $r=5\text{mm}$*

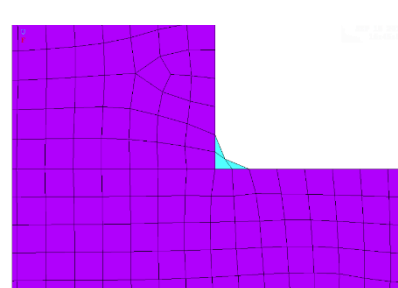


Mindegyik modell 5 különböző hálósűrűséggel:

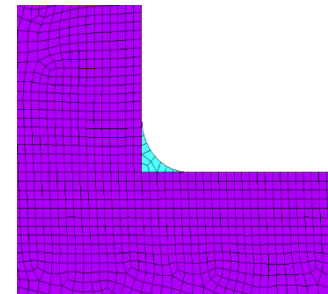
10 mm



5 mm

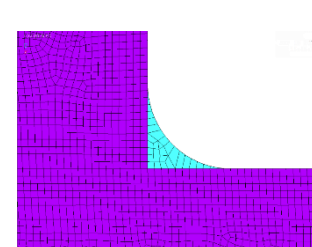


2,5 mm

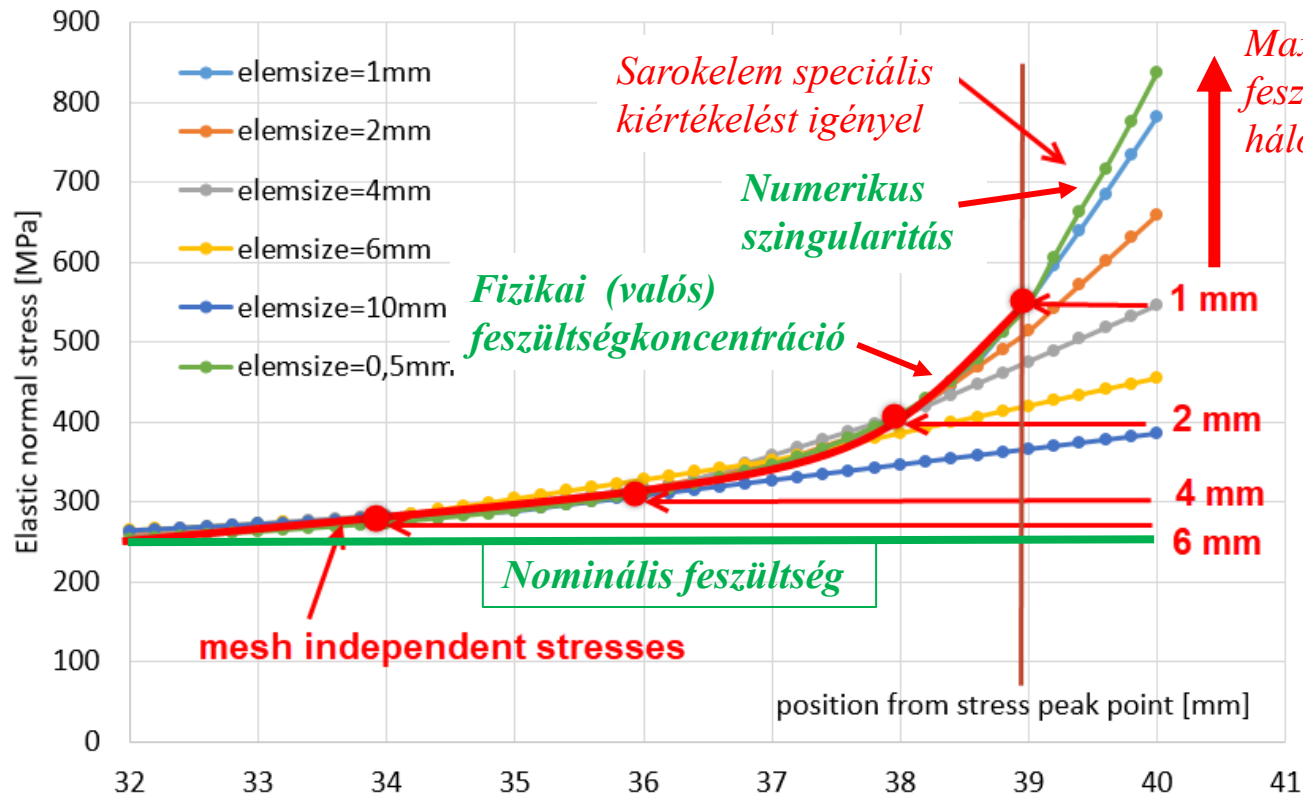


1 mm

0.5 mm



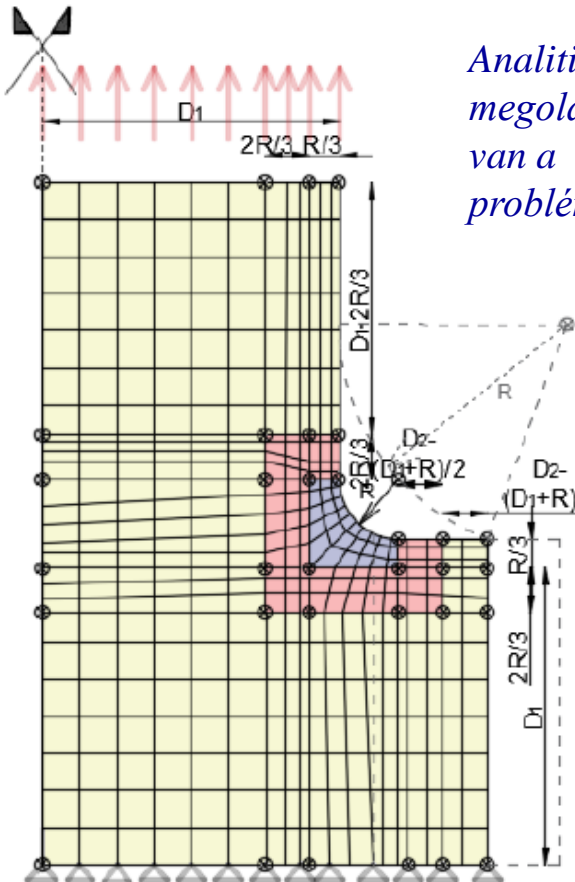
Hálófüggetlen feszültségmező



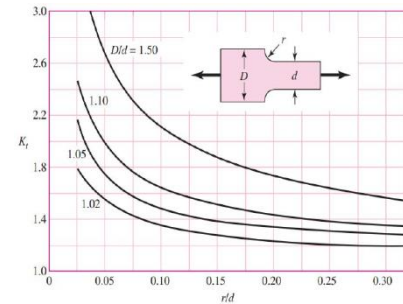
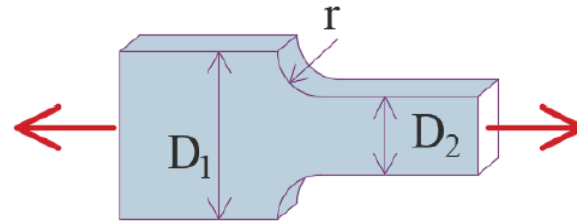
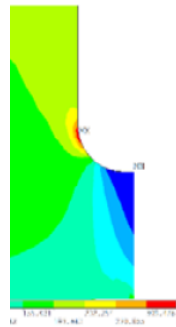
Hálófüggetlen feszültségmező: Azon számított feszültségértékek, melyek értéke hálósűrítéssel nem változik (1%-n belüli értékek). Hálófüggetlen feszültségmező csak a modellnek azon a részén létezik, ahol van számítási eredmény az alkalmazott VE hálónál sűrűbb hálózattal.

↓
Sarok melletti utolsó elembe nincs értéke.

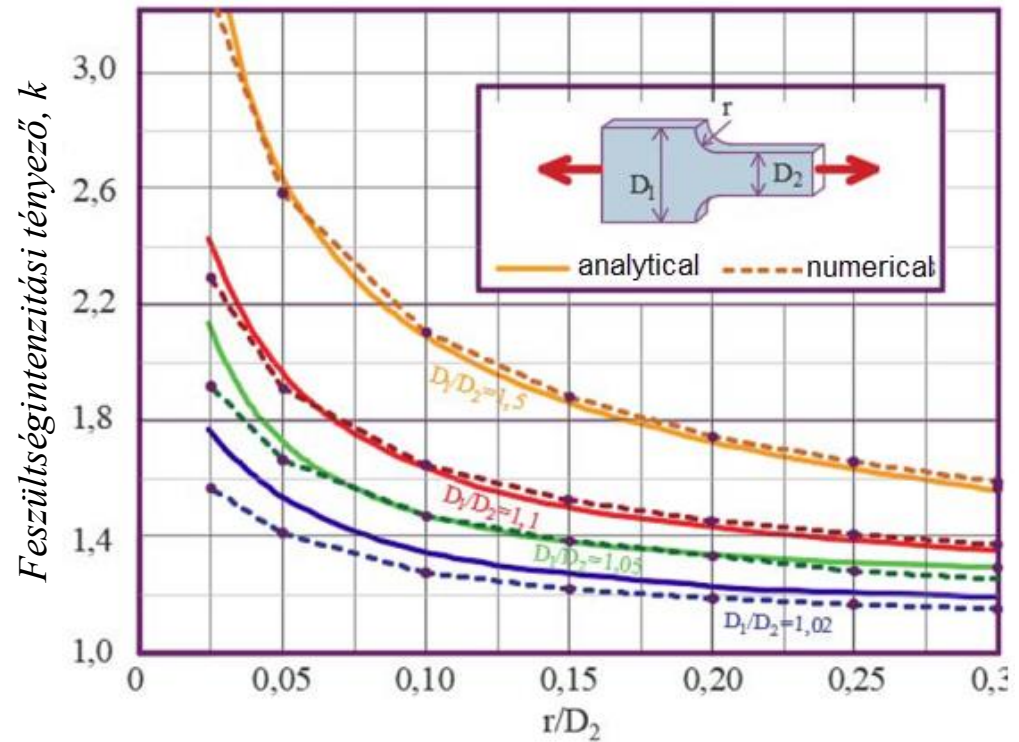
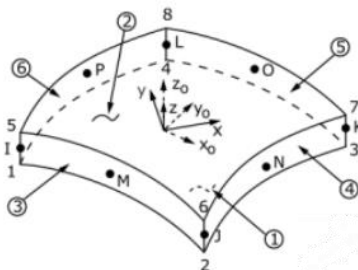
Lekerekített modellek vizsgálata



Analitikus megoldás van a problémára:

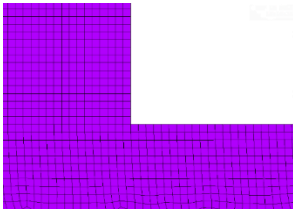


8 csomópontú végelem



Rugalmas számítások konklúziója

1. Éles sarkos modellek:

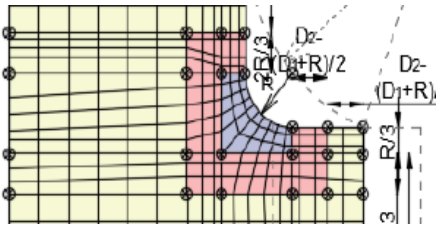


Hálófüggetlen feszültségmező meghatározandó



Az éles él melletti első elem eredménye nem tekinthető pontos eredménynek, hálósűrítés után sem.

2. Lekerekített sarkú modellek:



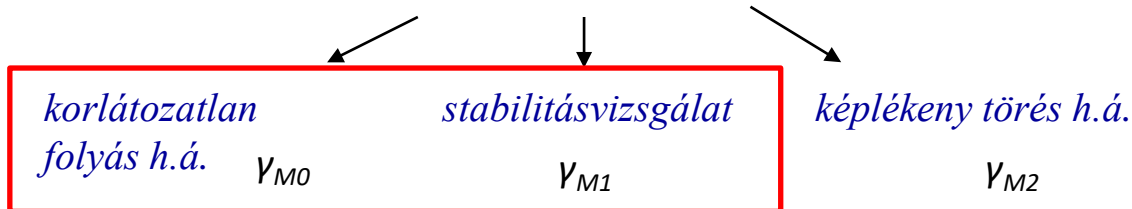
Hálófüggetlen feszültségmező a teljes modellben és nem túl sűrű hálóval is nagy pontossággal meghatározható (konvergencia vizsgálat ajánlott).



Fizikai feszültségkoncentráció ↔ numerikus szingularitás

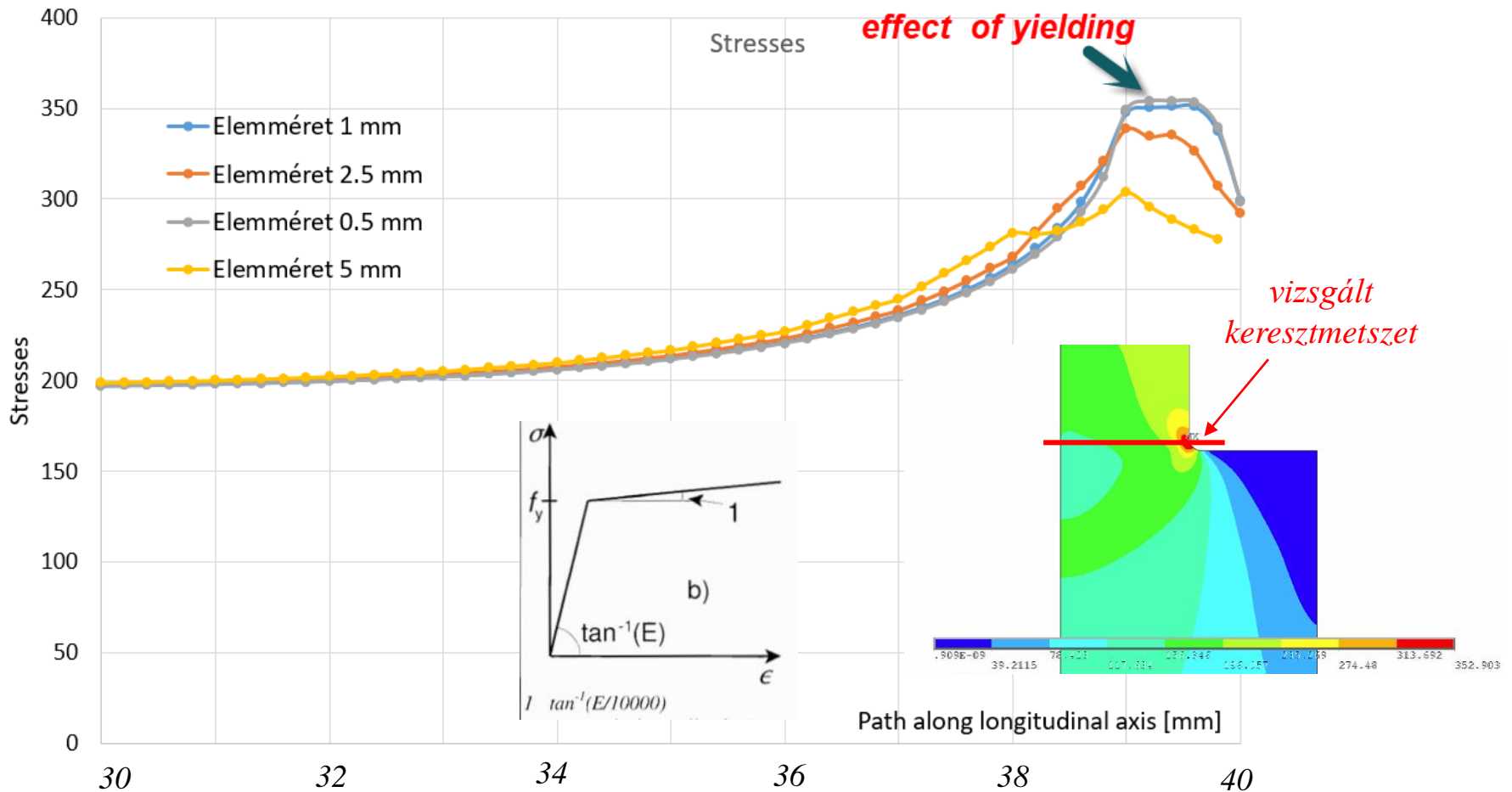
Kérdés: *Hogyan vegyük figyelembe a valós fizikai feszültségkoncentrációt? Hogyan ellenőrizzük rá a szerkezetet?*

Különböző módon (határállapot és analízis típus függvényében)



Anyagi nemlineáris analízis

rugalmas – képlékeny anyagmodell alkalmazásával

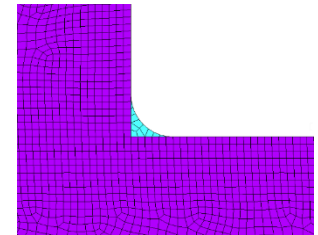
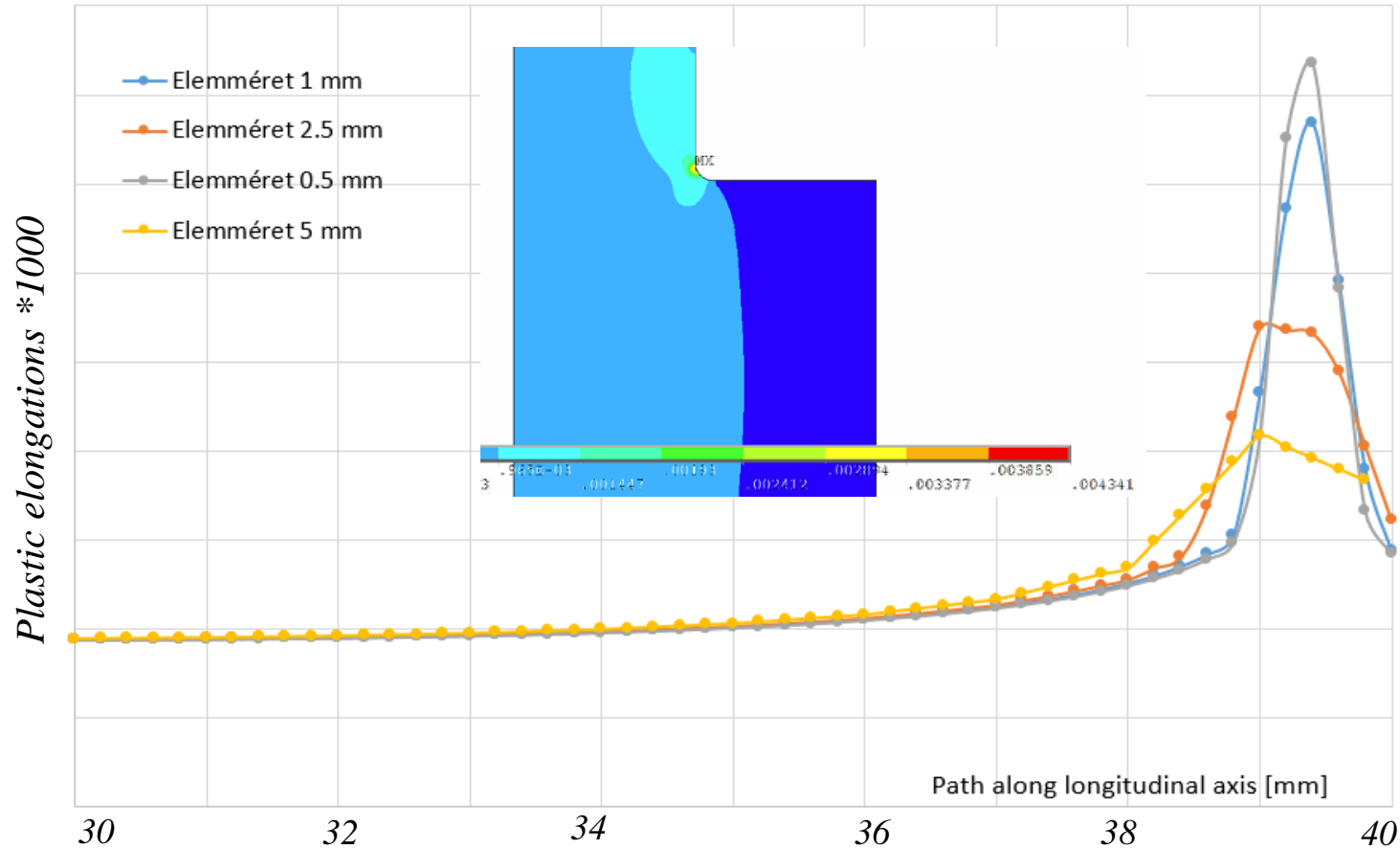


Feszültségkoncentrációnál megjelenik a folyás → képlékeny nyúlásokat kell ellenőrizni

Anyagi nemlineáris analízis

rugalmas – képlékeny anyagmodell alkalmazásával

*lekerekítéssel
 $r=5\text{mm}$*

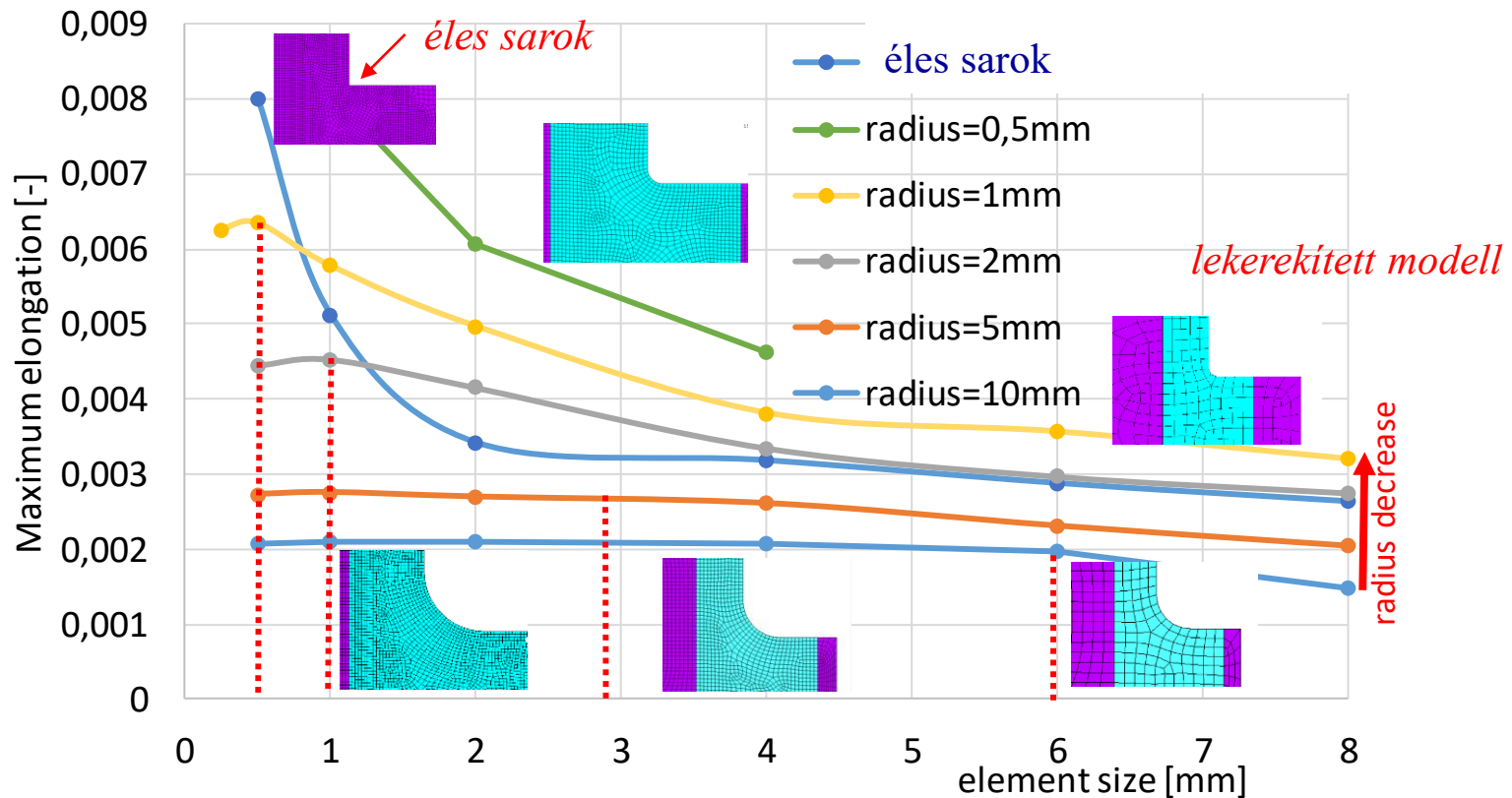


$$\mathcal{E}_{max} = 0.0043$$

Maximális képlékeny alakváltozás nő hálósűrítéssel.

Anyagi nemlineáris analízis

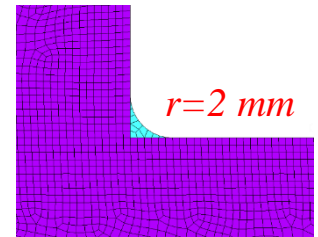
rugalmas – képlékeny anyagmodell alkalmazásával



- Következtetés:**
1. Éles sarok -> max. képlékeny deformációnak nincs max. értéke
 2. Lekerekített modell -> max. képlékeny deformáció tart egy határértékhez
-> lekerekítés mértékétől függ.
 3. Csökkenő lekerekítési sugárral -> nő a képlékeny deformáció max. értéke.

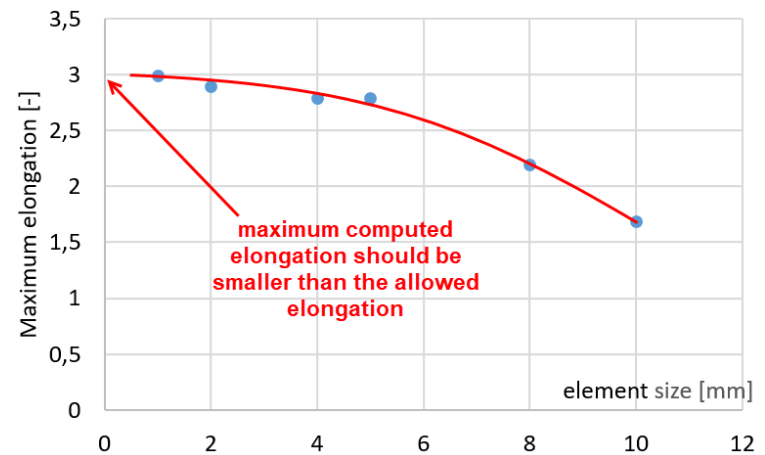
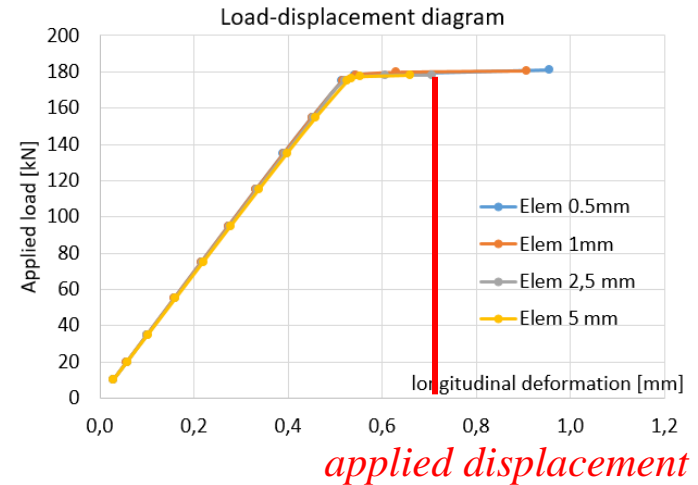
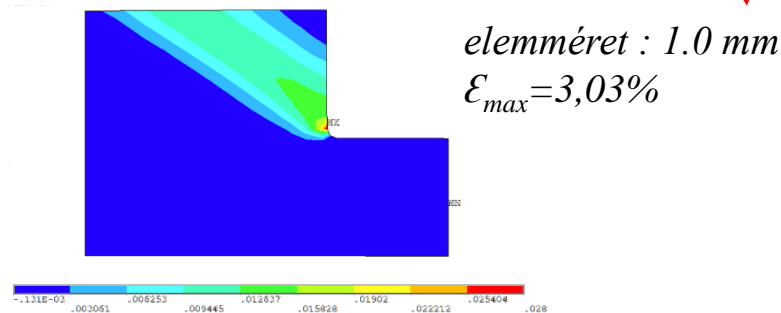
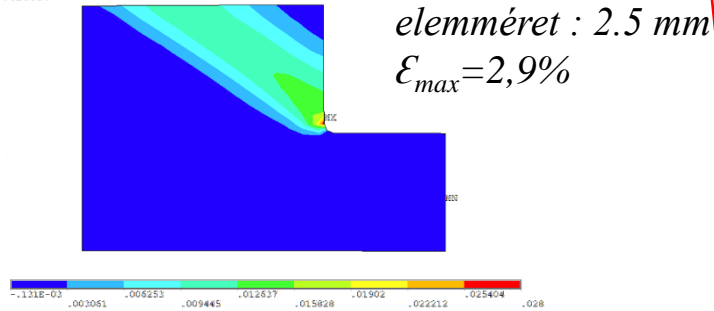
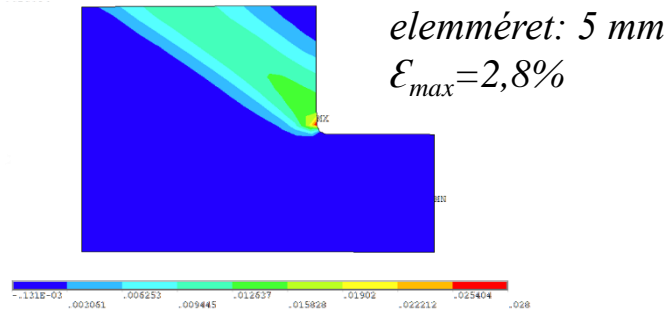
Numerikus szimuláció alkalmazásával

GMNA / GMNIA analízis



$r=2\text{ mm}$

Maximális képlékeny deformáció *meghatározott teherszinten:*

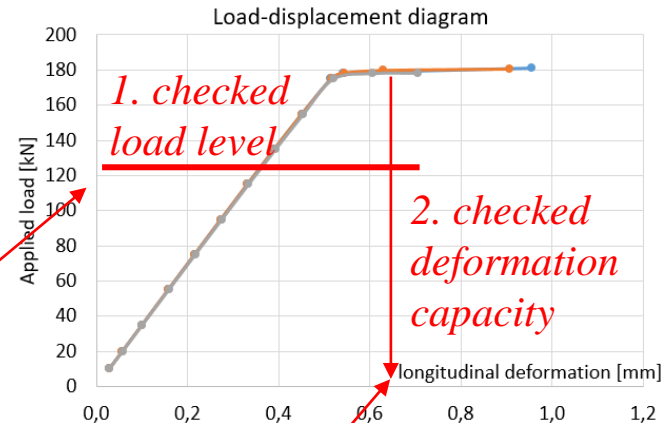


Képlékeny számítások konklúziója

1. Feszültségkoncentrációs zónában képlékeny deformációk keletkeznek
2. Max. képlékeny deformációkat kell ellenőrizni
képes-e a szerkezet a lokális képlékeny feszültségátrendezésre

Kiértékelési ajánlások:

1. Kihasználtság számítás max. képlékeny def. alapján
(meghatározott tervezési teherszinten)
2. Teherbírás számítás GMNA, GMNIA
(max. deformáció teherbírási teherszinten → anyag szakadása?)



3. Max. képlékeny deformációk nőnek a hálósűrítéssel és lekerekítési sugár csökkentésével / éles sarkok alk.
4. Kis lekerekítés mindenképpen modellezendő (nincs szabványos érték → valós érték / tervezői becslés alapján)

Méretezési kritérium: $\epsilon_{\max} < \epsilon_{\text{engedett}}$

Hegesztett acélhidaknál:

$$\epsilon_{\text{engedett}} = 5\%$$

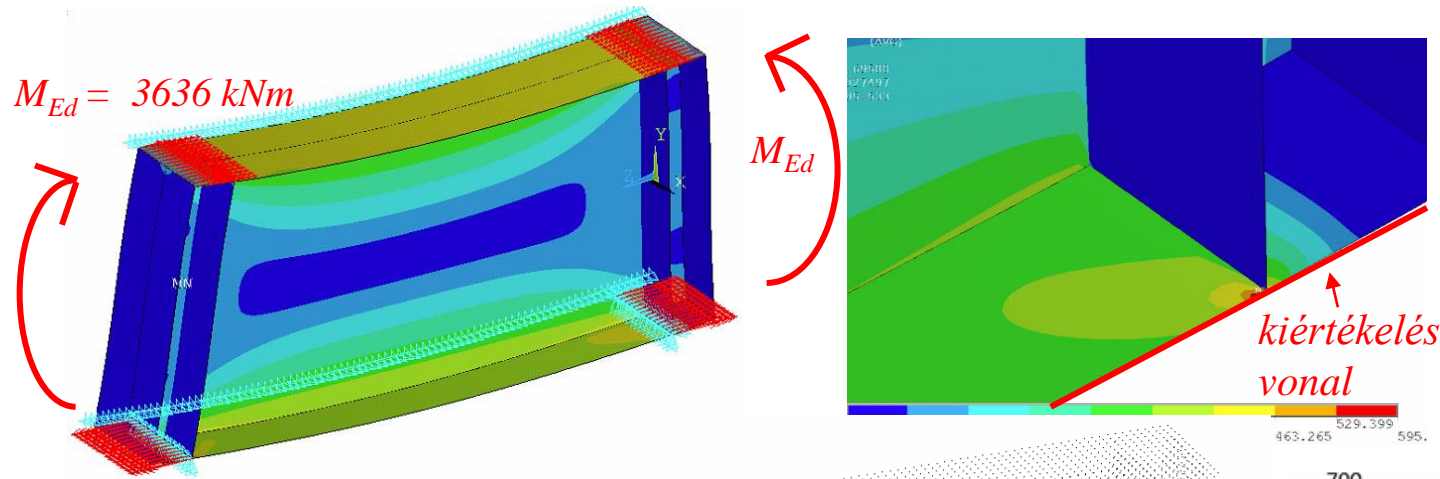
Tervezési mintapéldák

1. Rugalmas számítás, feszültségellenőrzés – feszültségkoncentráció vizsgálata
2. Képlékeny számítás – korlátatlan folyás és képlékeny törés határállapota
3. Lemezes szerkezetek stabilitásvizsgálata
4. Fáradásvizsgálat

4. km-i osztályú szelvény nyomatéki teherbírása

rugalmas számítás alapján

$b_f=400\text{mm}$
 $t_f=20\text{mm}$
 $h_w=1200\text{mm}$
 $t_w=6\text{mm}$

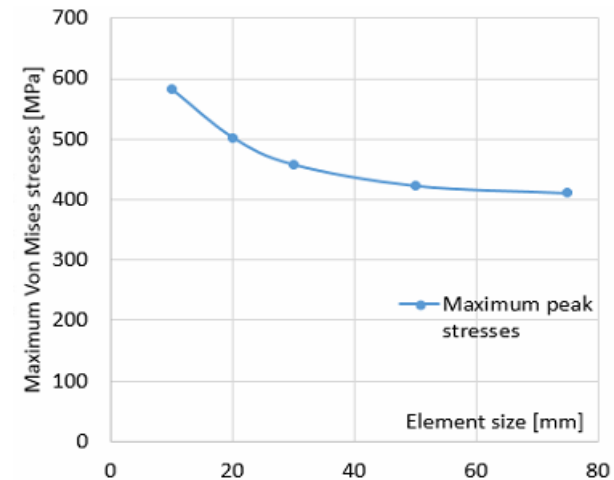
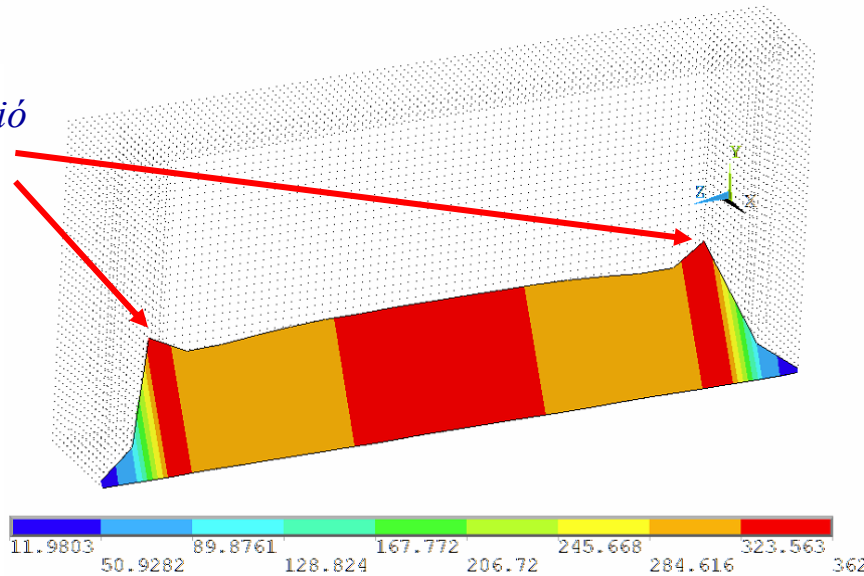
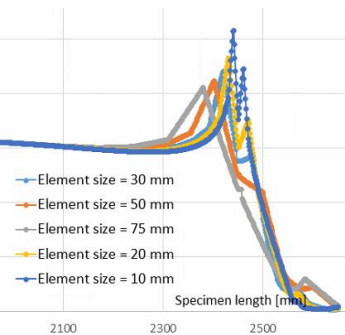


$$M_{pl,Rd} = 4231,6 \text{ kNm}$$

$$M_{el,Rd} = 3903,9 \text{ kNm}$$

$$M_{eff,Rd} = 3636,8 \text{ kNm}$$

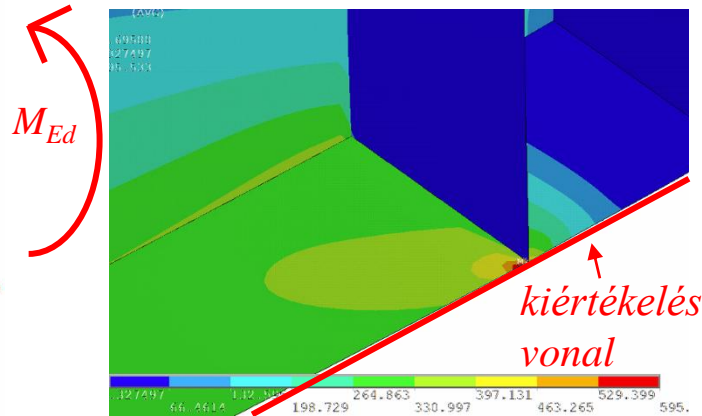
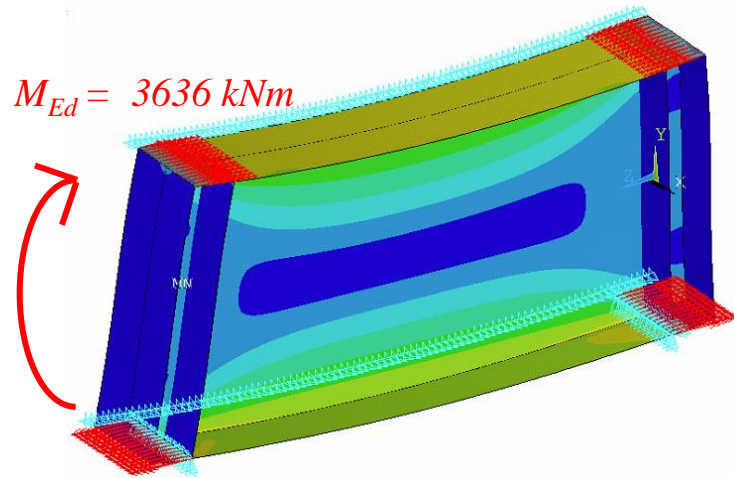
Feszültségkoncentráció a merevítőbordáknál



Maximális feszültség nő a háló sűrítésével – nincs max. érték

4. km-i osztályú szelvény nyomatéki teherbírása

rugalmas számítás alapján



$b_f = 400 \text{ mm}$
 $t_f = 20 \text{ mm}$
 $h_w = 1200 \text{ mm}$
 $t_w = 6 \text{ mm}$

$M_{pl,Rd} = 4231,6 \text{ kNm}$

$M_{el,Rd} = 3903,9 \text{ kNm}$

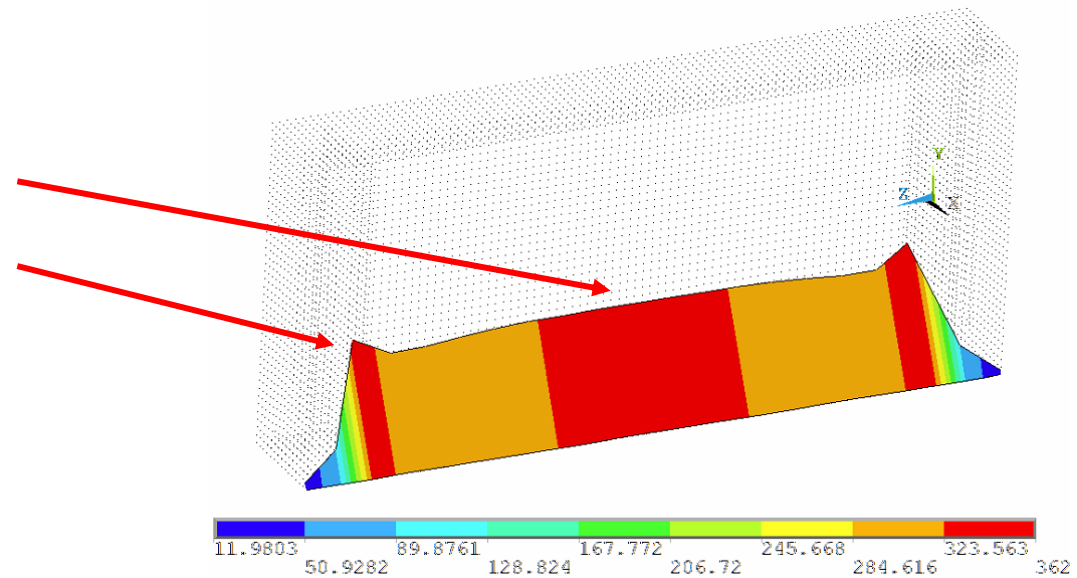
$M_{eff,Rd} = 3636,8 \text{ kNm}$

Kihasználtság:

- *átlagos feszültség alapján: 100%*
- *feszültségcsúcs alapján: 126 - 185% (VE háló függvényében)*



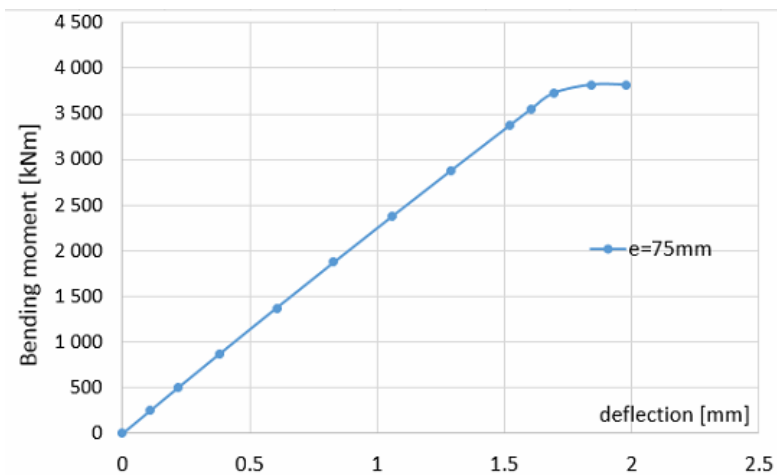
***NEM SZABAD
FESZÜLTSGKONCENTRÁCIÓ
ALAPJÁN MÉRETEZNI***



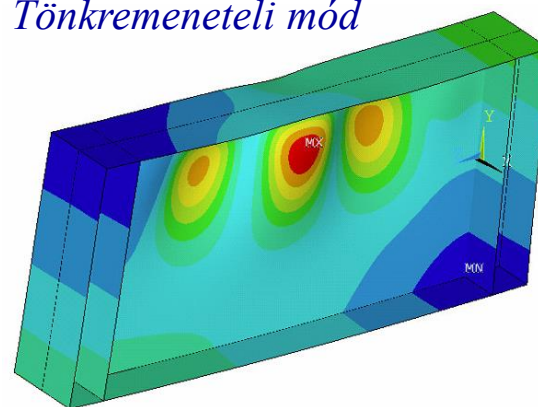
4. km-i osztályú szelvény nyomatóki teherbírása

képlékeny számítás alapján

Erő – elmozdulás diagram

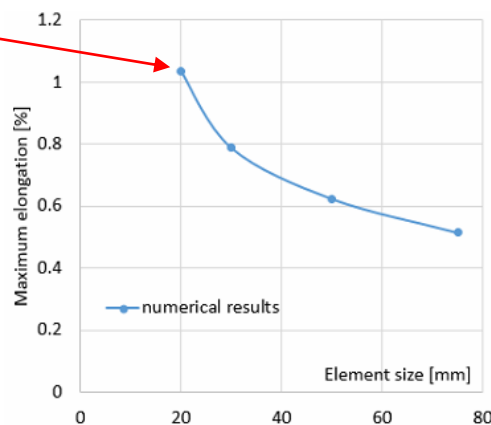
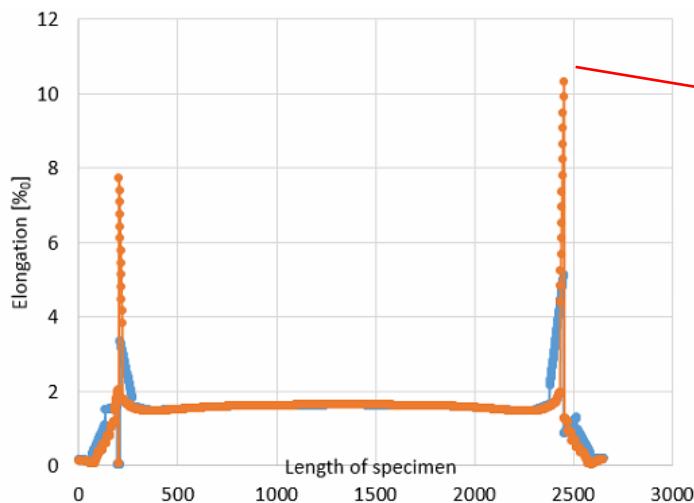


Tönkremeneteli mód



Teherbírás

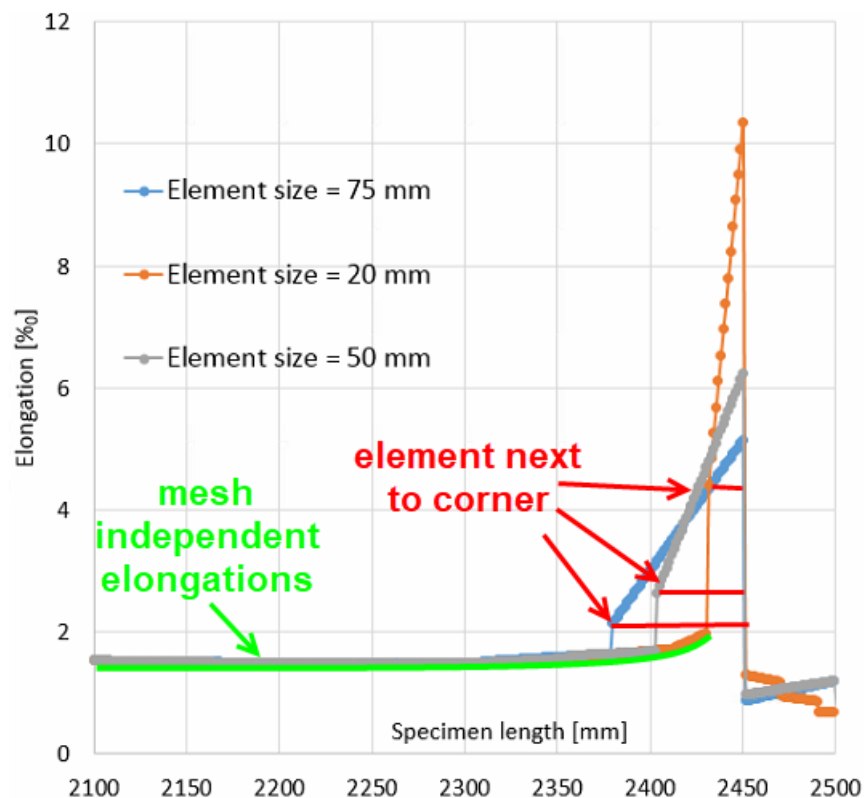
element size	resistance
10	3816.9
20	3816.875
30	3816.9
50	3816.9
75	3816.5



- *Hálóméretnek nincs jelentős hatása a teherbírásra és tönkremeneteli módra.*
- *Képlékeny deformációk nőnek a hálósűrítéssel.*
- *Képlékeny deformációk nem állnak be.*

4. km-i osztályú szelvény nyomatóki teherbírása

képlékeny számítás alapján



Hálófüggetlen képlékeny deformációk kiértékelése alapján.

- Hegesztett szerkezeteknél ésszerű távolság lehet a kiértékelés alapja (pl: varratméret + fél lemezvastagság)?

- Vagy lekerekítés beépítése a modellbe?

Kritérium: $\epsilon_{max} < \epsilon_{engedett}$

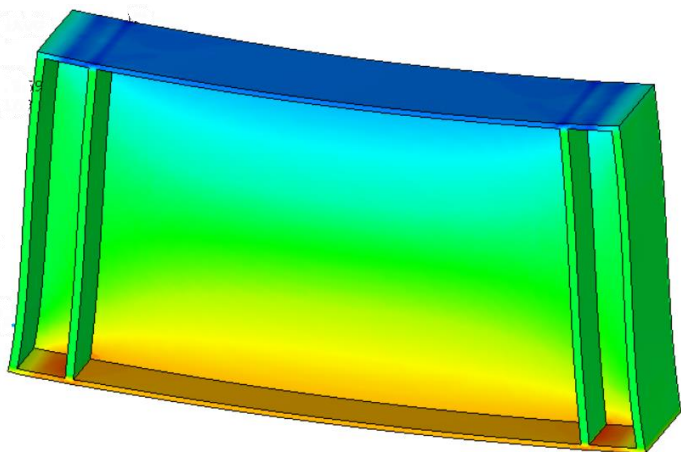
Hegesztett acélhidaknál:

$$\epsilon_{engedett} = 5\%$$

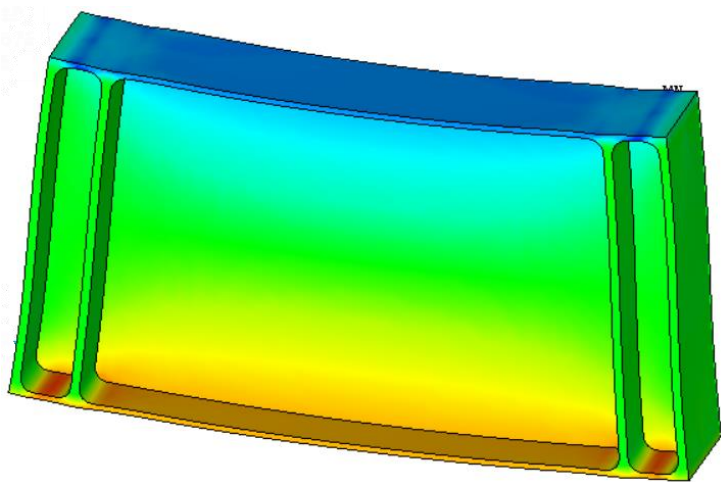
4. km-i osztályú szelvény nyomatéki teherbírása

képlékeny számítás alapján

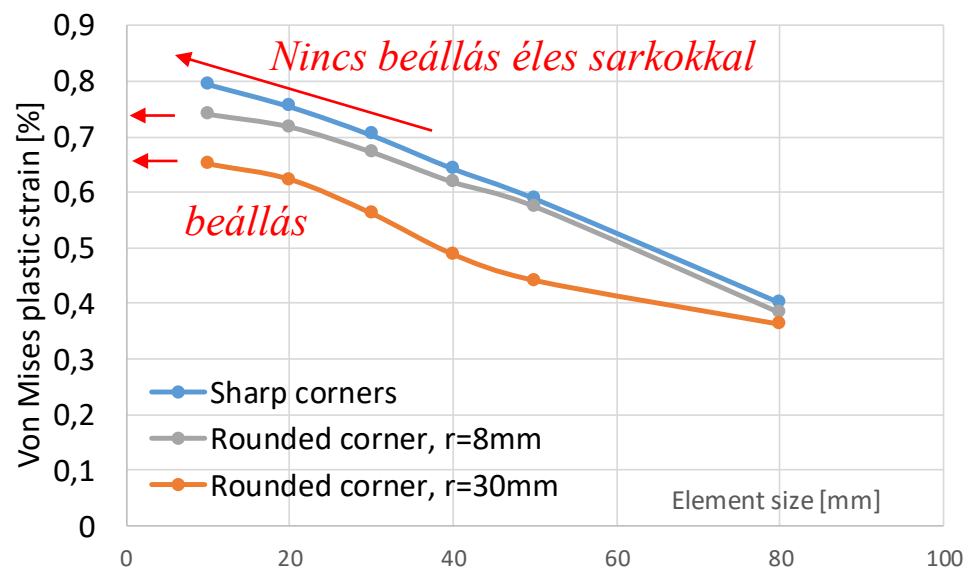
Testelemes modell éles sarkokkal



Testelemes modell lekerekített sarkokkal



Számított maximális képlékeny deformációk



Megfelelőség igazolása – tervezési stratégia:

1. Feszültségek kiértékelésében a fesz. koncentrációt elhanyagoljuk.
2. Feszültségkoncentrációt külön ellenőrizzük deformáció alapon.

$$\varepsilon_{max} = 0,8\% < \varepsilon_{allowed} = 5\%$$

Feszültségkoncentráció megfelelő.

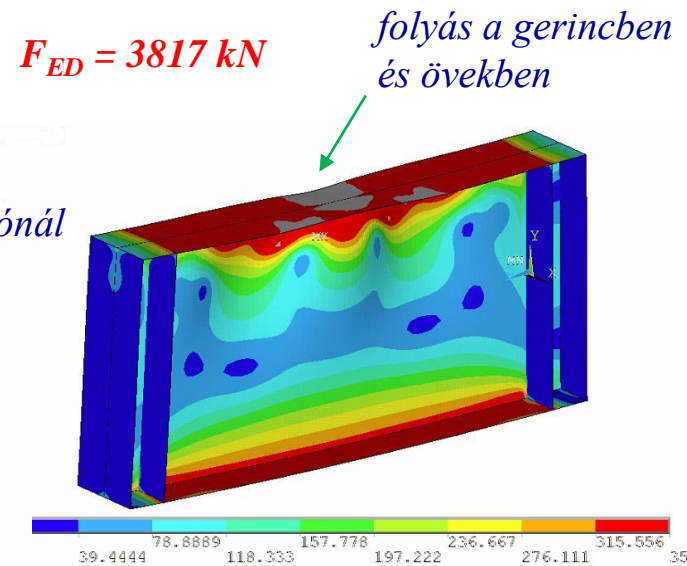
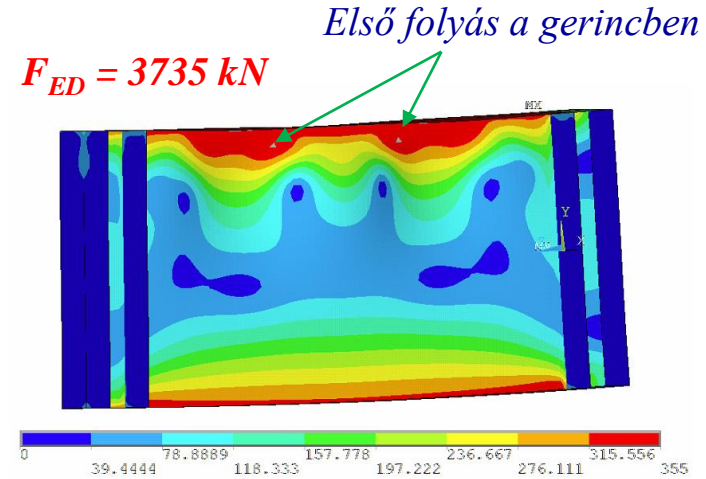
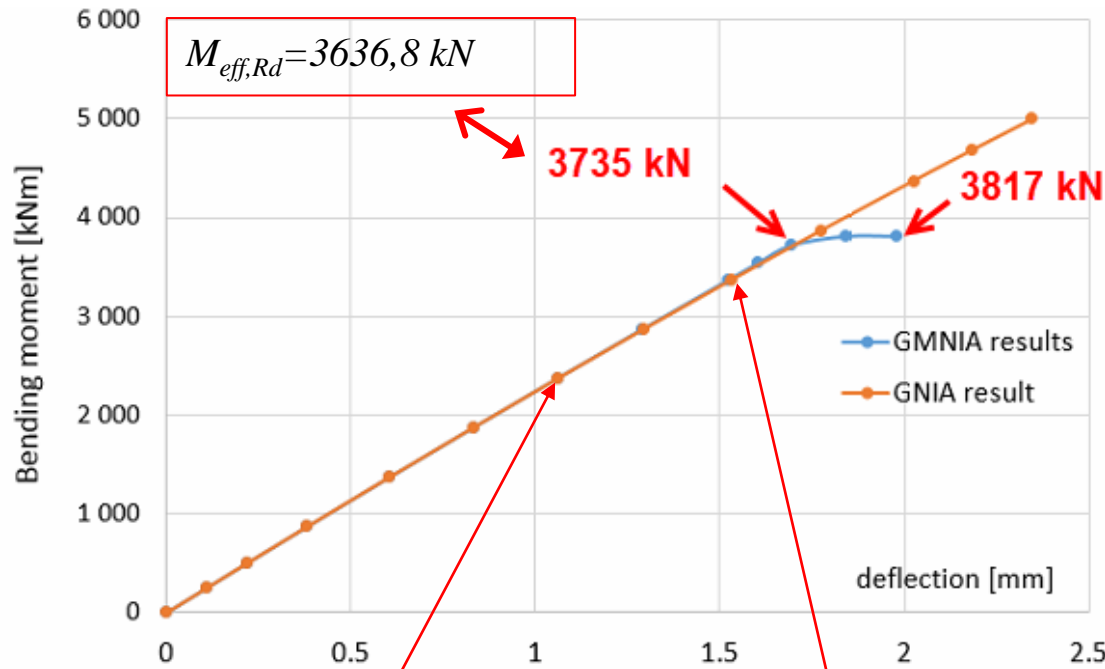


Kiértékelés első folyás határállapota alapján

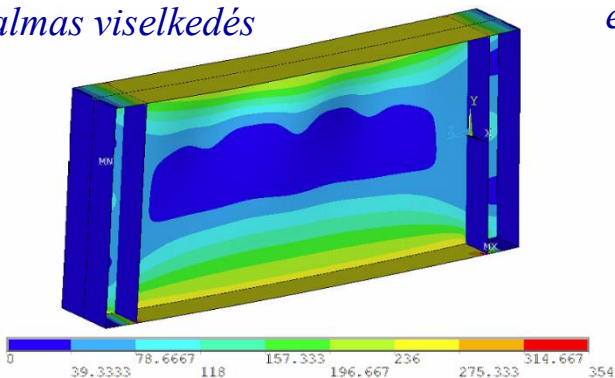
*Erő-elmozdulás diagramok összehasonlítása által
GNIA (GNA) és GMNIA (GMNA) számítások
alkalmazásával*

4. km-i osztályú szelvény nyomatéki teherbírása

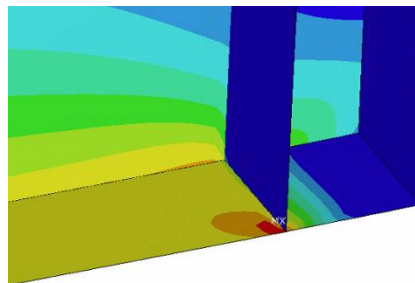
képlékeny számítás alapján



rugalmas viselkedés

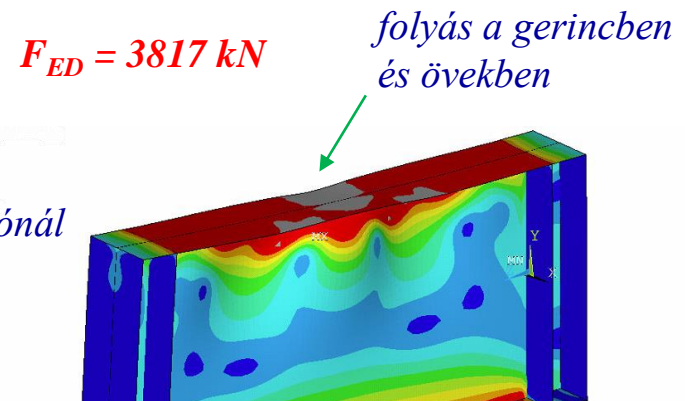
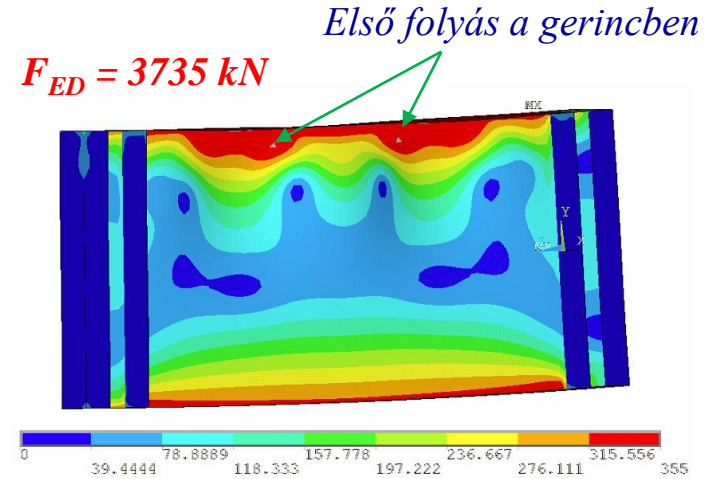
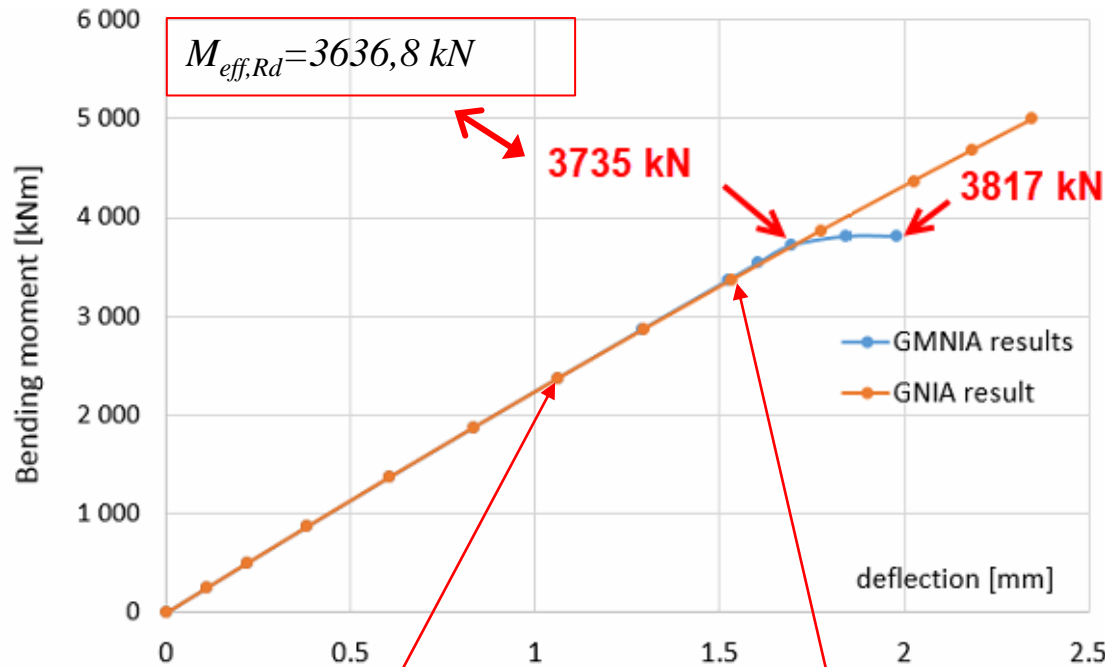


első folyás a fesz. koncentrációnál

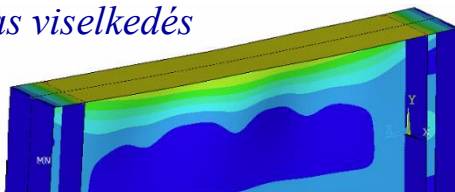


4. km-i osztályú szelvény nyomatéki teherbírása

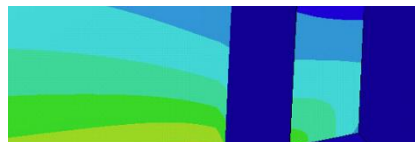
képlékeny számítás alapján



rugalmas viselkedés



első folyás a fesz. koncentrációnál

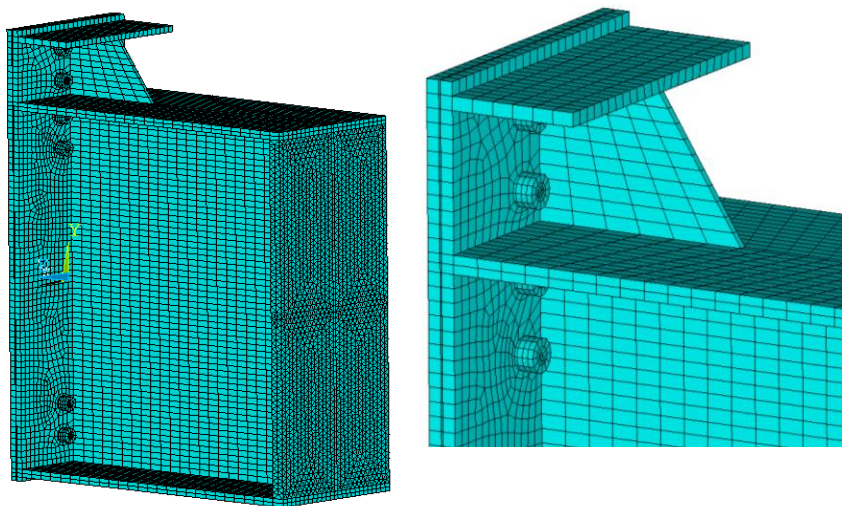


Első folyás határállapotának ellenőrzése erő-elmozdulás diagram nemlinearitásából értékelhető ki helyesen; rugalmas feszültséganalízisből és feszültségkoncentráció figyelembe vételéből nem, gazdaságtalan megoldásra vezet.

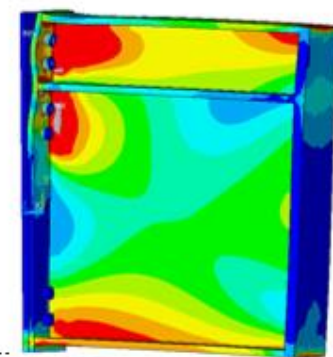
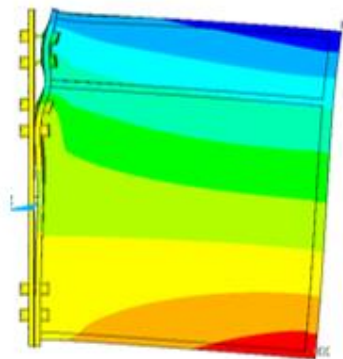
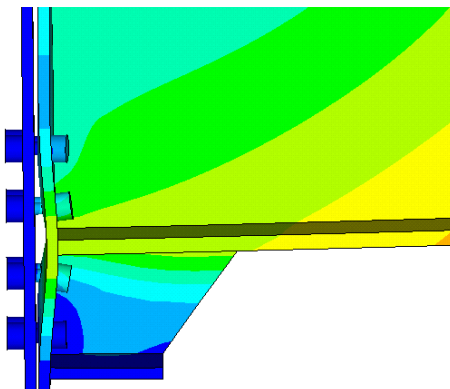
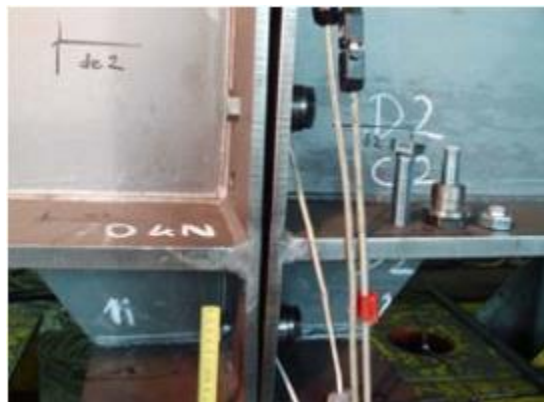
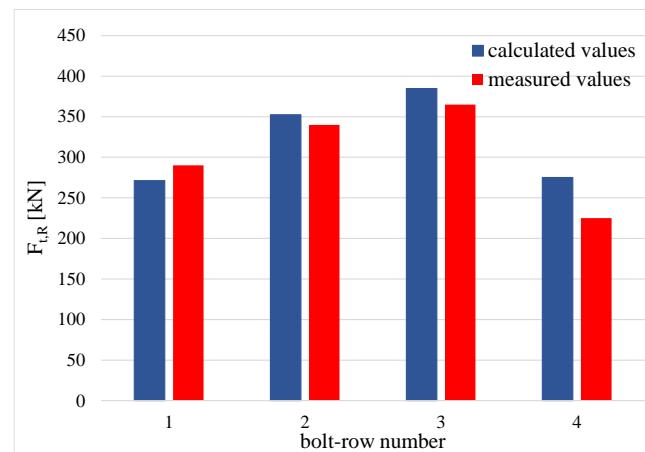
Tervezési mintapéldák

1. Rugalmas számítás, feszültségellenőrzés – feszültségkoncentráció vizsgálata
2. Képlékeny számítás – korlátolatlan folyás és képlékeny törés határállapota
3. Lemezes szerkezetek stabilitásvizsgálata
4. Fáradásvizsgálat

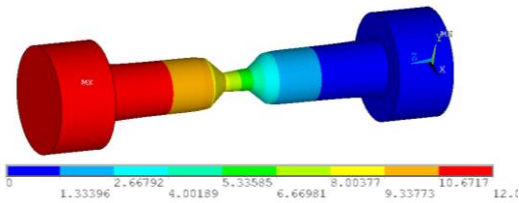
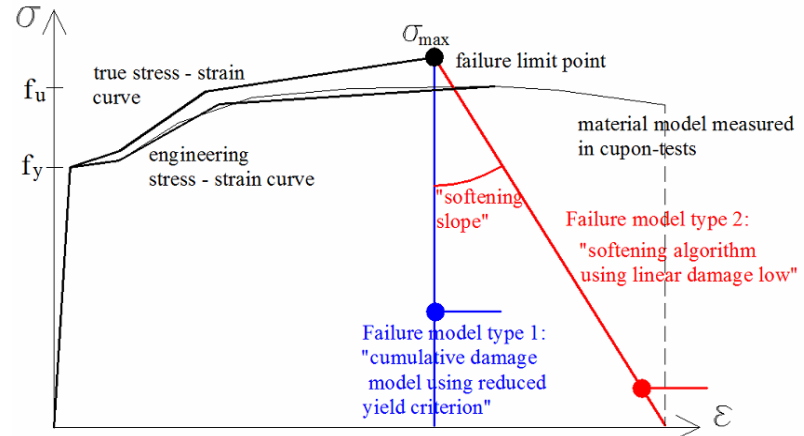
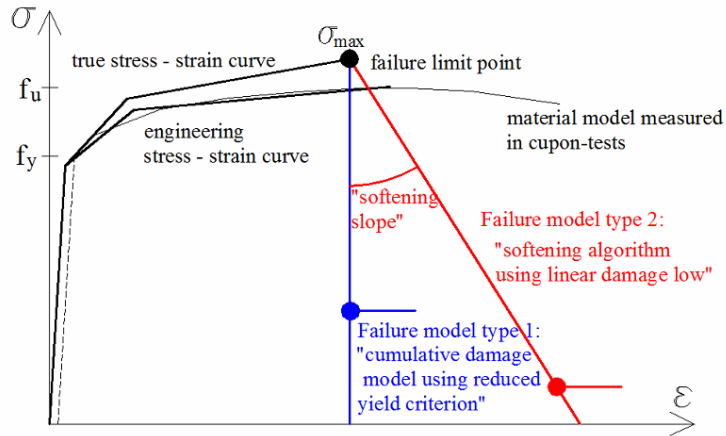
Kapcsolatok teherbírása – képlékeny méretezés



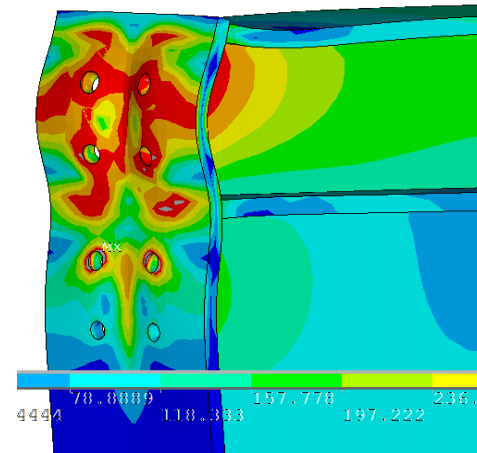
specimen	$M_{R, num}$ [kNm]	$M_{R, exp}$ [kNm]	difference [%]
#1	1433	1509	5,1%
#2	1515	1635	7,3%
#3	1490	1608	7,3%



Kapcsolatok teherbírása – képlékeny méretezés

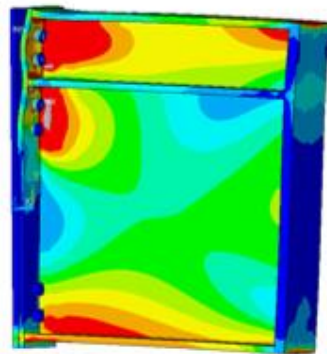
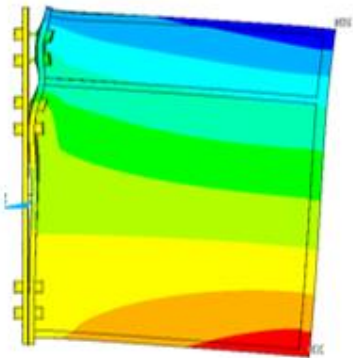
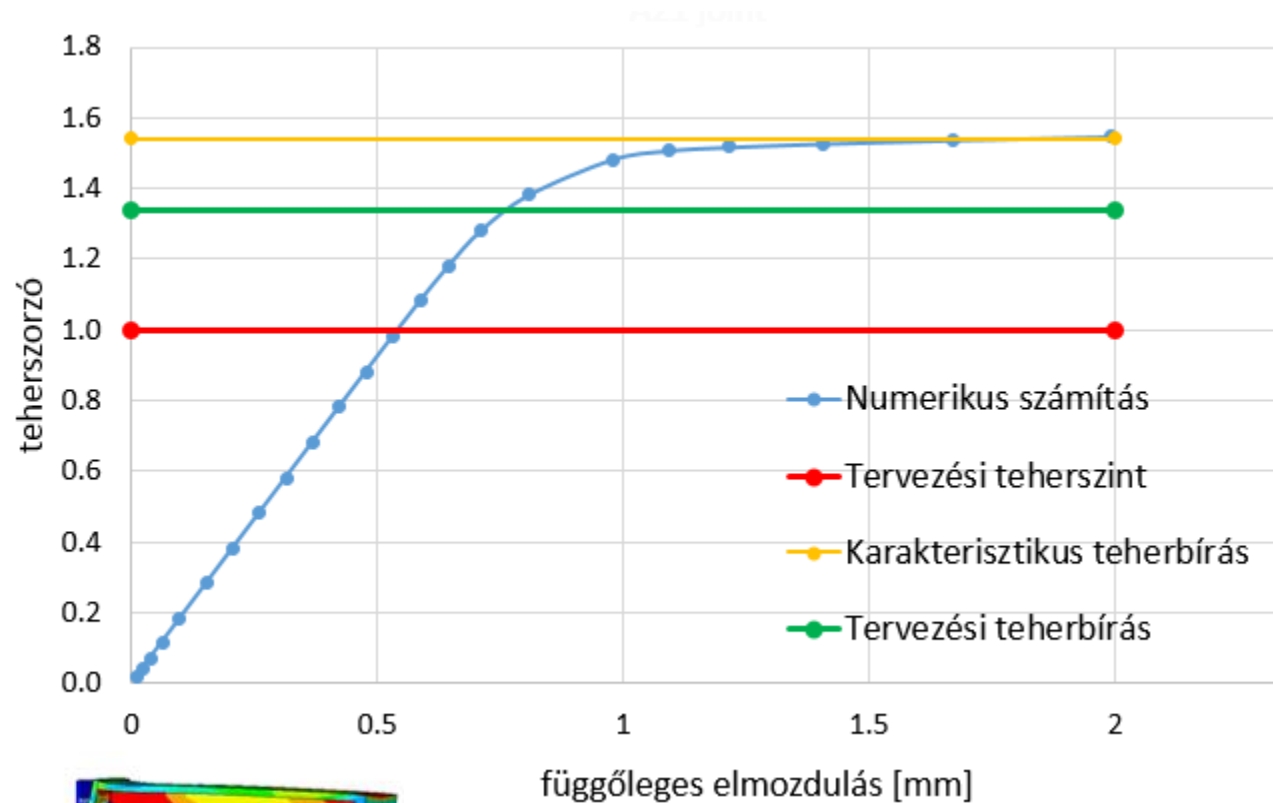


Csavarszakadás modellezése



képlékeny deformációk a homloklemezben

Kapcsolatok teherbírása – képlékeny méretezés



Tervezési mintapéldák

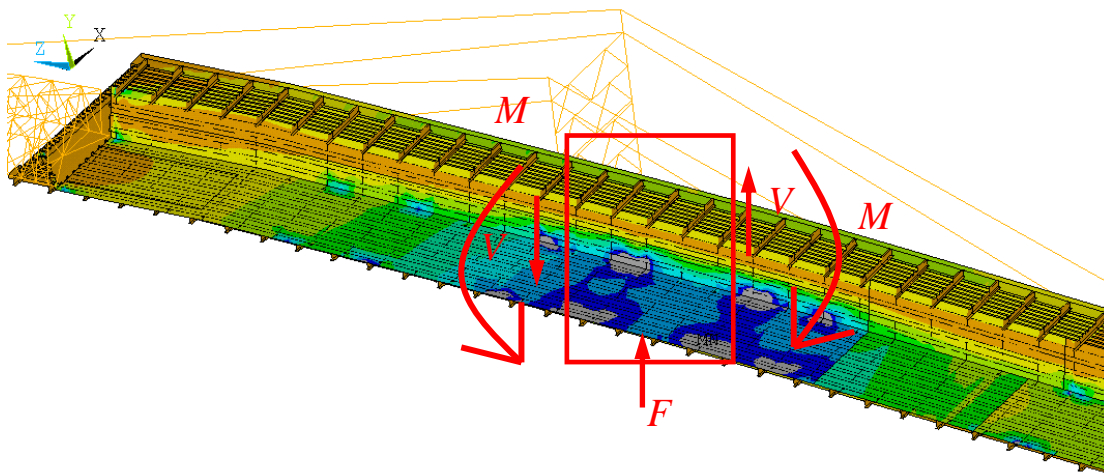
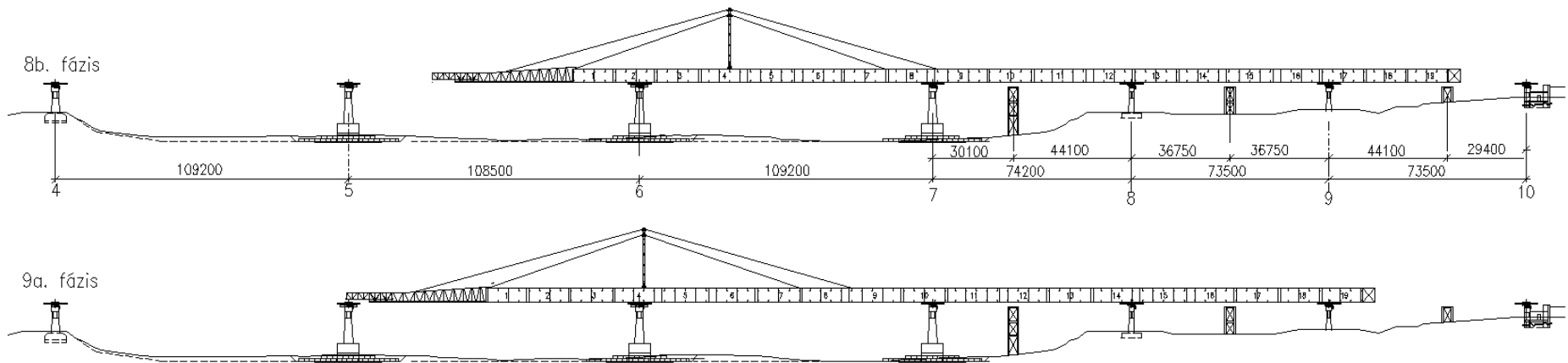
1. Rugalmas számítás, feszültségellenőrzés – feszültségkoncentráció vizsgálata
2. Képlékeny számítás – korlátolatlan folyás és képlékeny törés határállapota
3. Lemezes szerkezetek stabilitásvizsgálata
4. Fáradásvizsgálat

Lemezes szerkezetek vizsgálata - hídbetolás



Betolásvizsgálat

Betolási folyamat szimulációja – felszerkezet és tolópálya statikai ellenőrzése



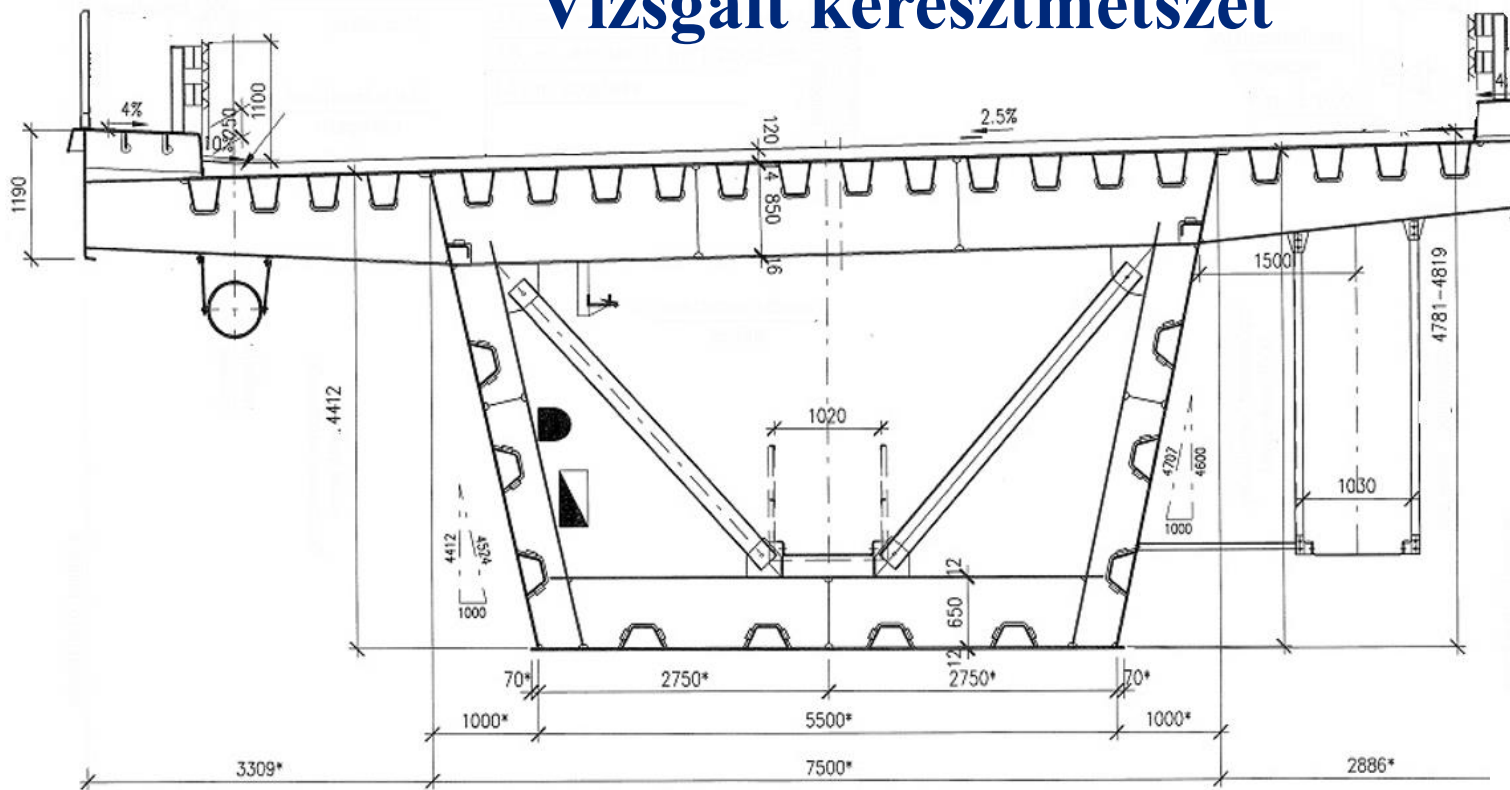
Felmerült problémák:

- 1. Mértékadó lemezmező ellenőrzése egyidejű M-V-F hatásra*
- 2. Beroppanási ellenállás kézi számítással kisebb volt a maximális reakcióerőnél.*



Bordák kerültek az alsó lemezmezőbe

Vizsgált keresztmetszet



Kereszttartó
4 m-ként

Gerinc és
fenéklemez
merevítőbordák

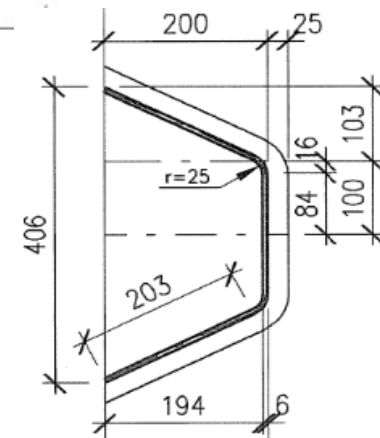
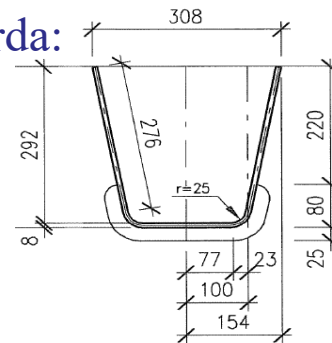
Acél anyag: S355

Felső öv: 13800 x 14 mm

Gerinc: 4500 x 12 mm

Alsó öv: 5500 x 12 mm

Pálya hosszborða:



Beroppánási ellenállás

Betolósos építésmódnál → beroppánás mértékadó lesz



kis bordák a beroppánás elkerülésére

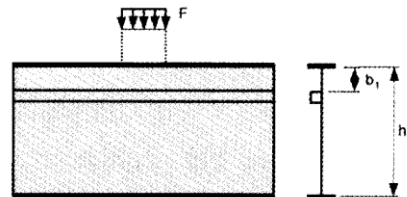
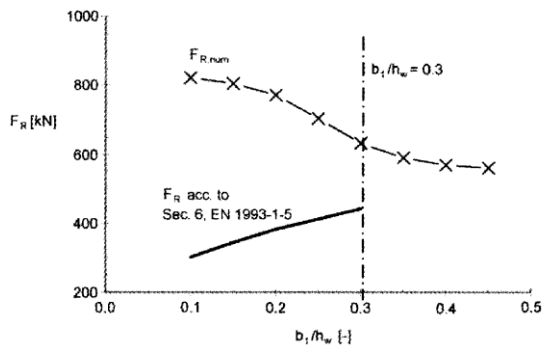


- költséges
- fáradásra érzékeny



Probléma oka:

EN 1993-1-5 méretezési módszere ↔ valós ellenállás →



- Nagy eltérés a kézi számítások és numerikus szimulációk / kísérletek eredményei között.

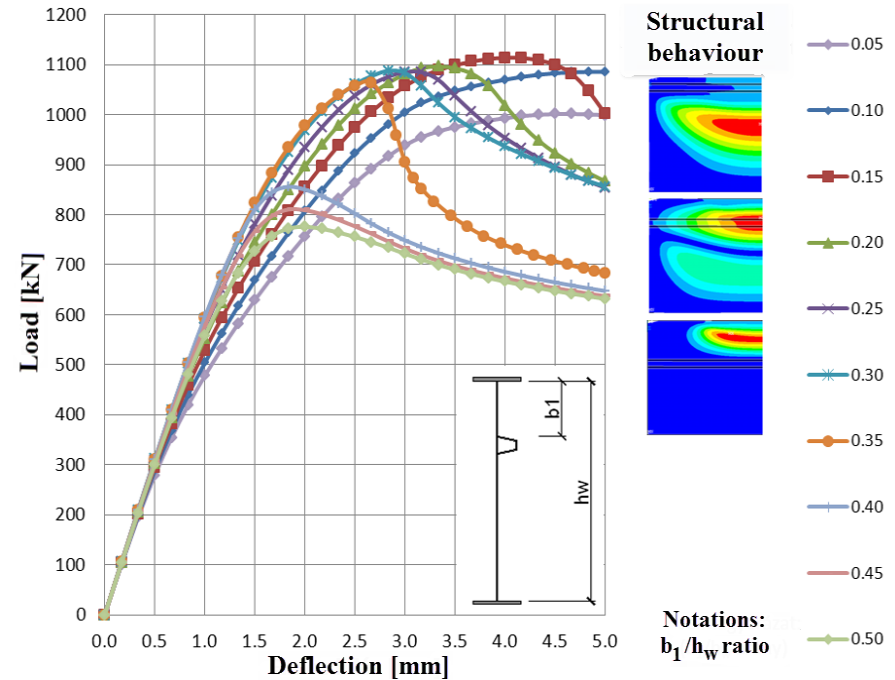
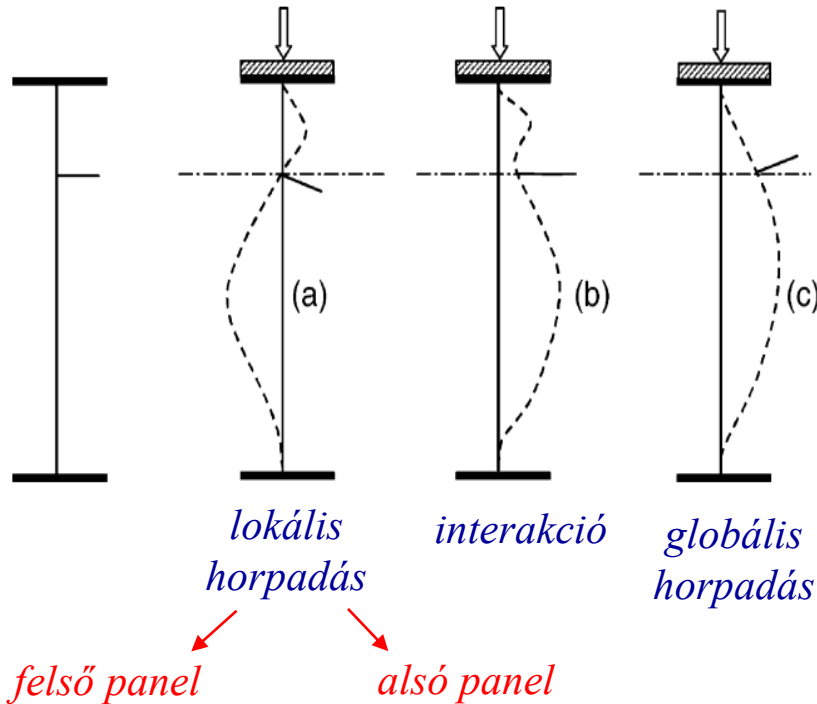
- A teherbírásnövekedés a merevítőborda hatására nem megfelelő a szabványban.



- Méretezési eljárás módosításra szorul

Beroppadási ellenállás

Összetett tönkremeneteli mód



Melyik a mértékadó, függ:

- borda helyzetétől (b_1/t_w)
- bordák számától
- borda merevségétől (erős/gyenge)
- erőbevezetési hosszától (s_s/b_1)
- lemezmező oldalárányaitól

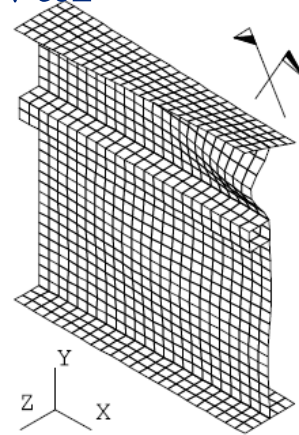


Méretezési eljárásnak tudnia kéne:

- tönkremeneteli módok között választani
- a megfelelő szerkezeti viselkedést követni
- jelenlegi módszer 5-ből 1-re működik megfelelően.

5 tönkremeneteli mód – 1 méretezési eljárás

Módosított beroppanási ellenállás – 1 hosszbordával



Jelenleg az *EN 1993-1-5 előírása:*

$$F_{Rd} = \chi_F \cdot \frac{l_y \cdot f_{yw} \cdot t_w}{\gamma_{M1}} \leq 1.0$$

The reduction factor χ_F should be obtained by

$$\chi_F = \frac{1.0}{\varphi_F + \sqrt{\varphi_F^2 - \bar{\lambda}_F}} \leq 1.0$$

where:

$$\varphi_F = \frac{1}{2} \left(1 + \alpha_{F0} \cdot (\bar{\lambda}_F - \bar{\lambda}_{F0}) + \bar{\lambda}_F \right)$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y \cdot t_w \cdot f_{yw}}{F_{cr}}}$$

$$\alpha_{F0} = 0.75 \quad \bar{\lambda}_{F0} = 0.50 \quad \text{if} \quad \gamma_{M1} = 1.10$$

The effective loaded length l_y should be calculated by

$$l_y = s_s + 2 \cdot t_f \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{b_f}{t_w}} \right)$$

Jelenlegi képlet:

$$F_{cr} = 0,9 \cdot k_F \cdot E \cdot \frac{t_w^3}{h_w}$$

$$k_F = 6 + 2 \cdot \left(\frac{h_w}{a} \right)^2$$

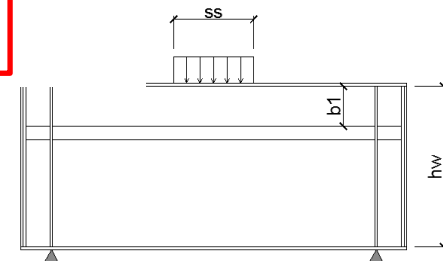
$$k_F = 6 + 2 \cdot \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 + \left(5,44 \cdot \frac{b_1}{a} - 0,21 \right) \cdot \sqrt{\gamma_s}$$

Új egyenlet:

$$k_{F,2} = \left(0,8 \cdot \frac{s_s + 2 \cdot t_f}{a} + 0,6 \right) \cdot \left(\frac{a}{b_1} \right)^{\left(0,6 \cdot \frac{s_s + 2 \cdot t_f}{a} + 0,5 \right)}$$

$$F_{cr,2} = k_{F,2} \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{t_w^3}{b_1}$$

$$F_{cr} = \frac{F_{cr,1} \cdot F_{cr,2}}{F_{cr,1} + F_{cr,2}}$$

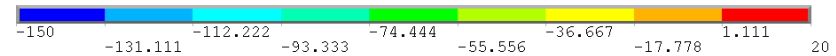
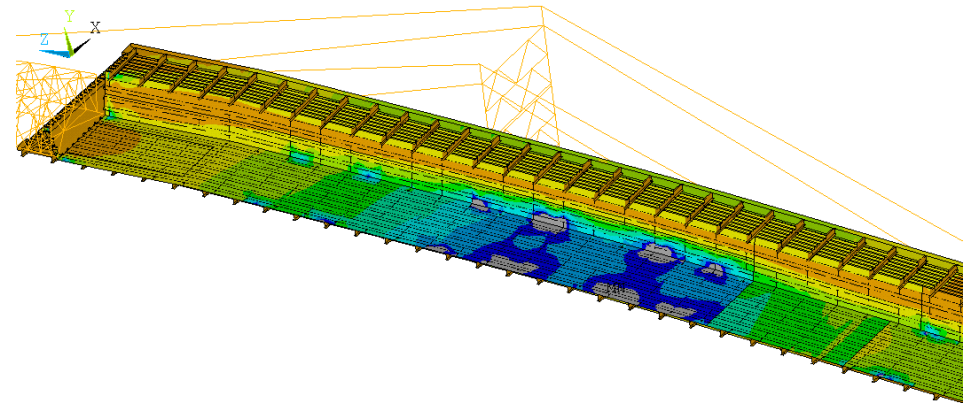
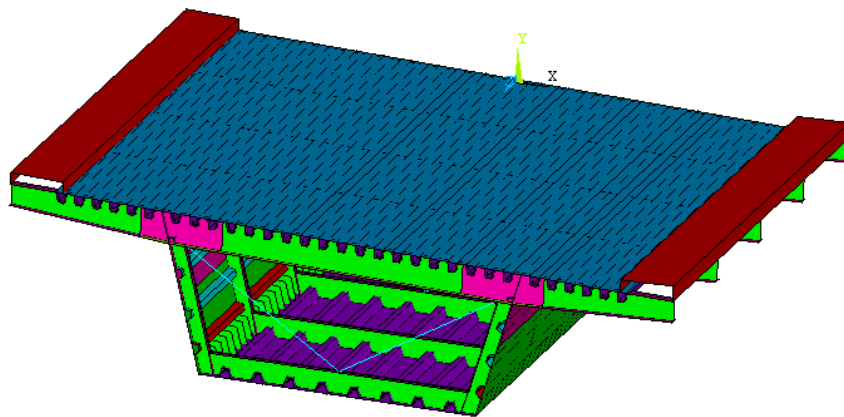
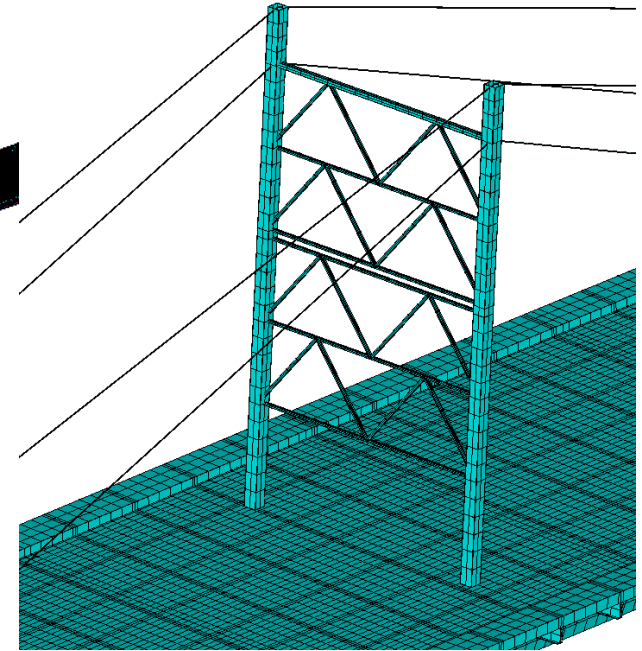
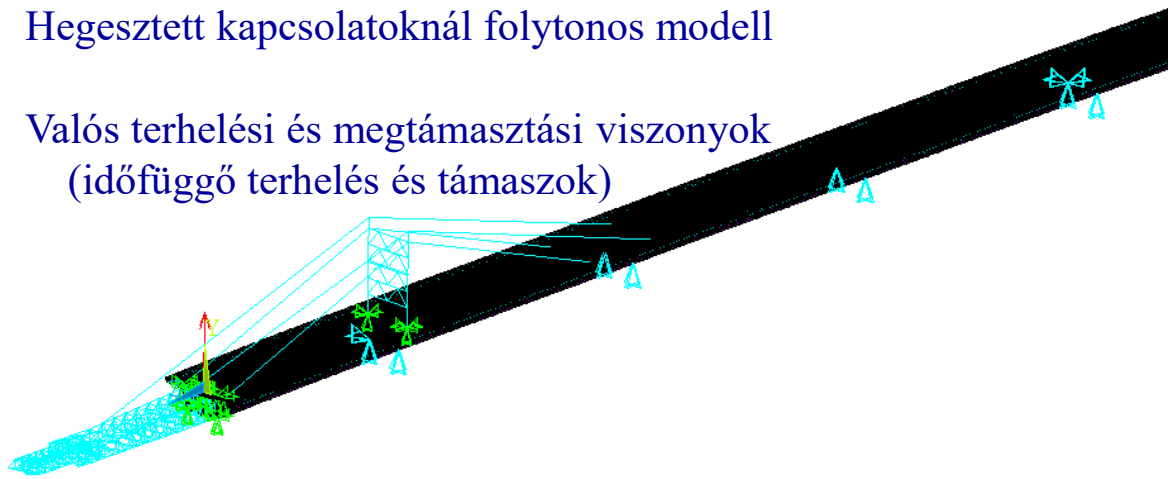


Alkalmazott numerikus modell

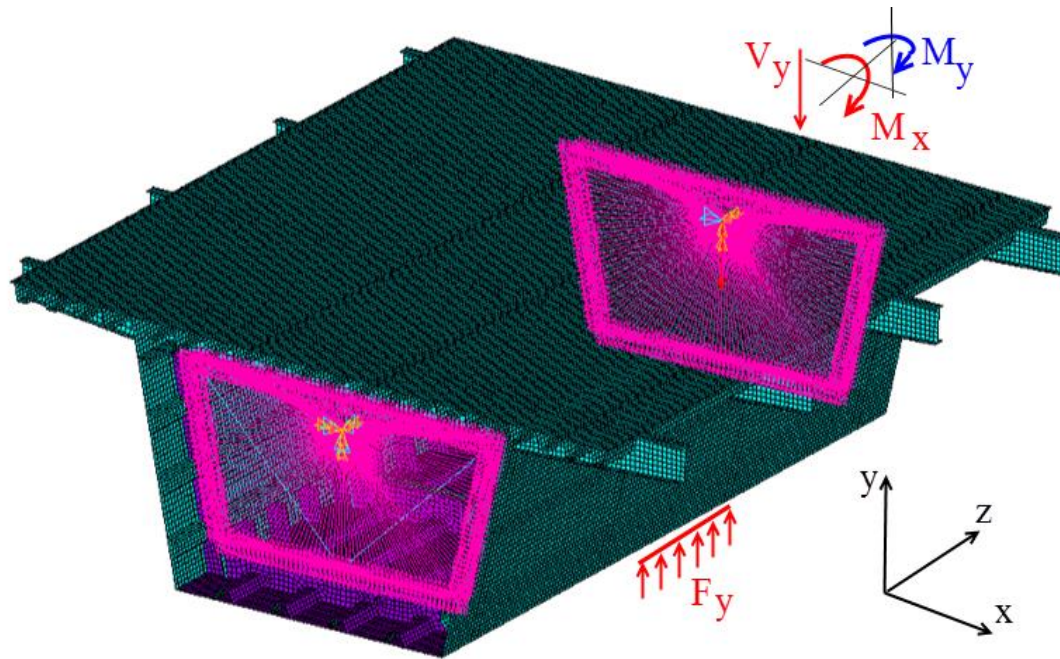
3D-s héjszerkezeti modell

Hegesztett kapcsolatoknál folytonos modell

Valós terhelési és megtámasztási viszonyok
(időfüggő terhelés és támaszok)



Alkalmazott lokális modell



Teljes szegmens héjmodellből készült

Finomított végeleemes háló

Szegmensmodell végein a globális modellt (supports and loads)

Betolópád helyén 2500 mm hosszön függőleges erőbevezetés (s_s)

Egyik oldalon a keresztmetszet súlypontja van megtámasztva: eltolódás (UX, UY, UZ) és elfordulás (ROTX, ROTY, ROTZ) ellen.

Másik oldal a km. Súlypontja meg van támasztva eltolódás UY, UX és elfordulás ellen ROTY DOFs, valamint igénybevételek kerültek alkalmazásra (V_y , M_x és M_y) a globális modell igénybevételei alapján.

Méretezési modellszintek definíciója

Tervezési numerikus modellek

Tervezési számítások lineáris vagy nemlineáris számítás alapján a tervezési állapotjellemzők (igénybevételek) és/vagy teherbírás meghatározására.

*Analízis, kiegészítő kézi ellenőrzéssel
(LA, LBA, GNA, GNIA, MNA)*

- *rugalmas anyagmodell*
- *számítás eredménye állapotjellemzők, melyeket további kézi számítás használ fel*

*Közvetlen teherbírásvizsgálat
(MNA, GMNA, GMNIA)*

- *nemlineáris számítás*
- *eredmény a szerkezet teherbírása*

geometriai és anyagjellemzőket nominális értékekkel definiálunk

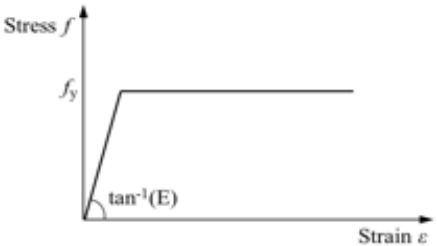
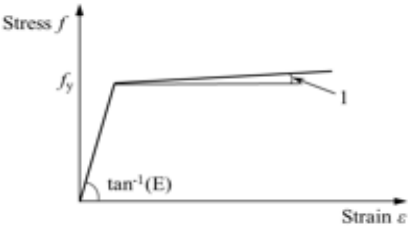
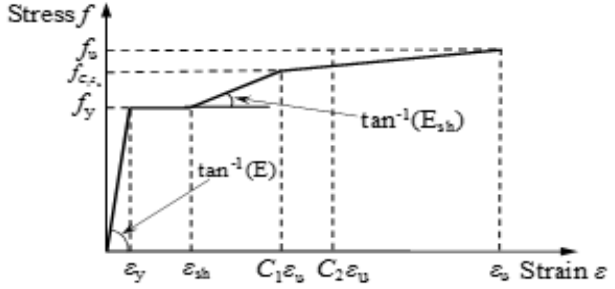
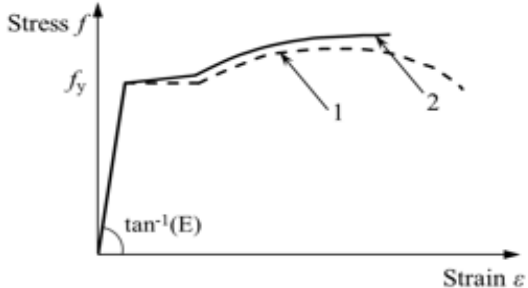
Numerikus szimulációk

Fizikai kísérletek reprodukálása, vagy kiterjesztése a szerkezet teherbírásának meghatározására

- *nemlineáris anyagmodell*
- *geometriai nemlinearitás*
- *imperfekciók*
- *eredmény a szerkezet teherbírása*

geometriai és anyagjellemzőket mért (vagy átlagos) értékkel definiáljuk

Anyagmodell

Model		
with yielding plateau	 <p>(a)</p>	 <p>1 $\tan^{-1}(E/10\ 000)$ (or similarly small value)</p> <p>(b)</p>
with yielding plateau and strain hardening	 <p>(c)</p>	
using measured stress-strain curve	 <p>1 stress-strain curve from tensile test 2 true stress-strain curve</p> <p>(d)</p>	

Az első három anyagmodell által adott számítási eredmények és a teherbírásra gyakorolt hatásuk kerül összehasonlításra.

Anyagmodell bemenő adatai:

$$\varepsilon_{sh} = 0.015; \varepsilon_u = 0.182; C_1 = 0.31; C_2 = 0.448; C_1 \cdot \varepsilon_u = 0.057; C_2 \cdot \varepsilon_u = 0.082; E_{sh} = 2310 \text{ MPa}$$

Imperfekciók

Ekvivalent geometriai imperfekciók kerülnek alkalmazásra

Definiálási lehetőségek:

- Kézzel definiált imperfekciók szabványos alaknak megfelelően.
- Sajátalakkal affin imperfekciók.

Méretezési szabványok:

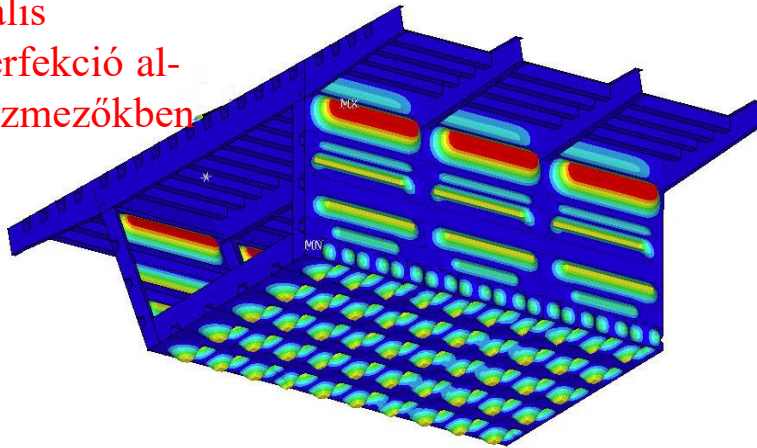
- Minden lehetséges tönkremeneteli módnak megfelelő imperfekció alkalmazandó a modellen.
- A lehető legkedvezőtlenebb, de fizikailag lehetséges imperfekció irány és kombináció alkalmazandó.
- Imperfekció irányát úgy kell megválasztani, hogy a legkisebb teherbírást eredményezze.
- Ha több tönkremeneteli mód van, imperfekció kombinációkat kell alkalmazni.
- Imperfekció kombináció képzési szabályok vannak – hasonlóan a teherkombinációképzéshez.
- Mindegyik imperfekció kell legyen egyszer kiemelt imperfekció, a többi pedig egyidejű imperfekció.

Korábbi számítások eredményei igazolják, hogy a sajátalak formájú imperfekciók alkalmazása általában biztonság oldalán lévő megoldásra vezet.

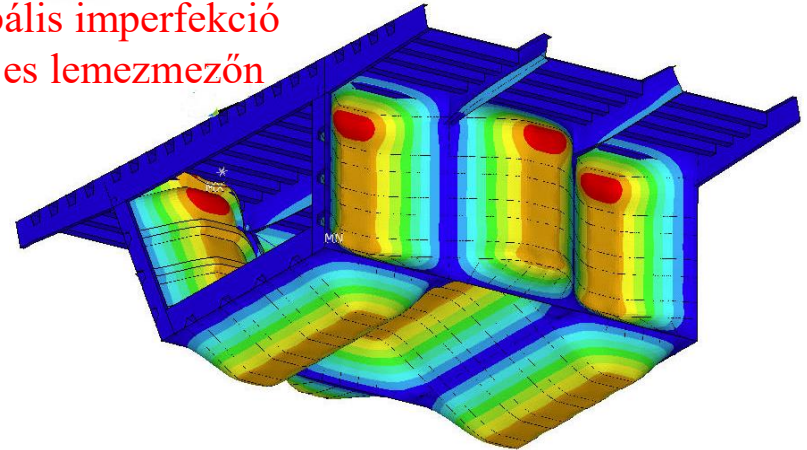
Imperfekciók

1. Ekvivalens geometriai imperfekciók

Lokális imperfekció al-lemezmezőkben



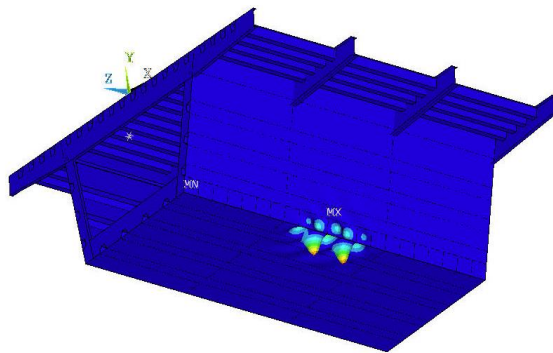
Globális imperfekció a teljes lemezmezőn



2. Sajátalak formájú imperfekciók

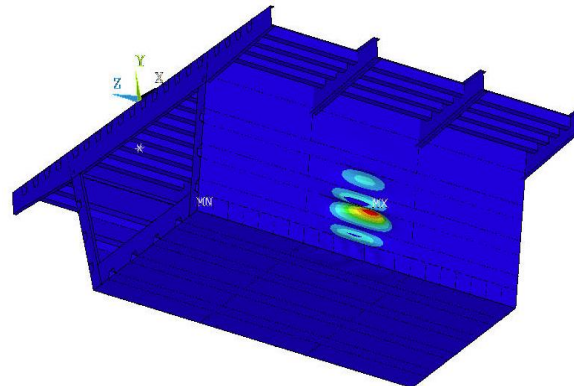
FONTOS: MINDEN TÖNKREMENETELI MÓDOT FEDJENEK LE

Mode #1



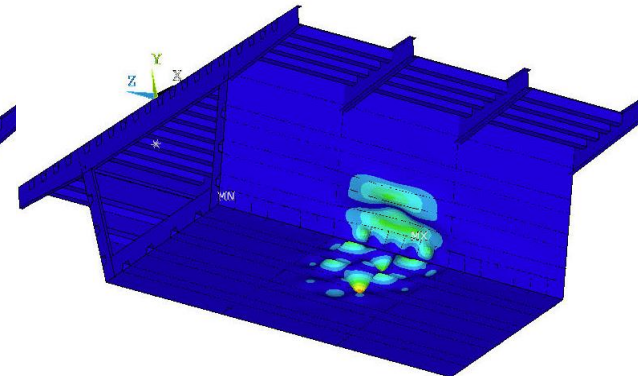
alsó övlemez lokális horpadása

Mode #3



gerinclemez lokális horpadása

Mode #4

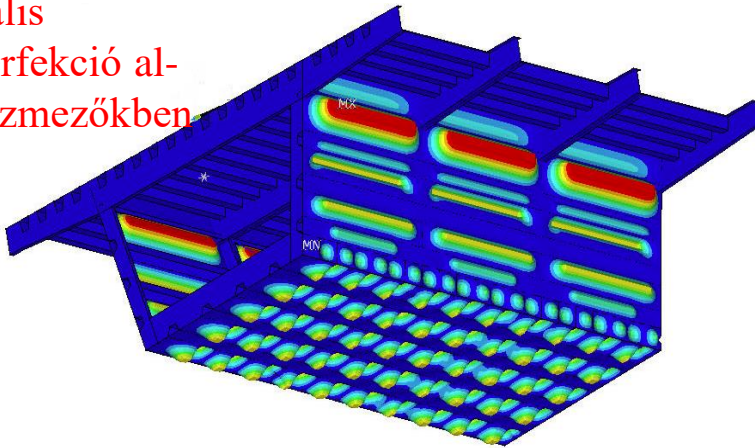


merevítőborda globális horpadása

Imperfekciók

1. Ekvivalens geometriai imperfekciók

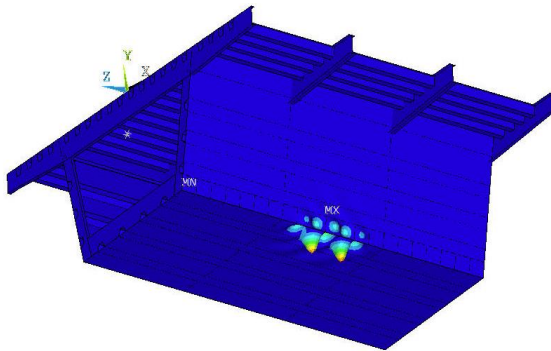
Lokális imperfekció al-lemezmezőkben



Maximális amplitúdó:
 $\min(a/200, b/200)$ ahol a és b are a vizsgált lemezmező hossza és szélessége.

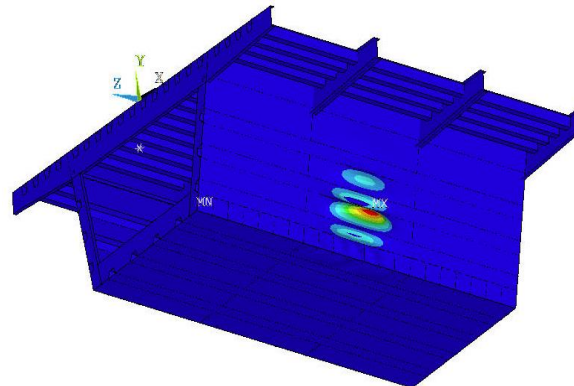
2. Sajátalak formájú imperfekciók

Mode #1



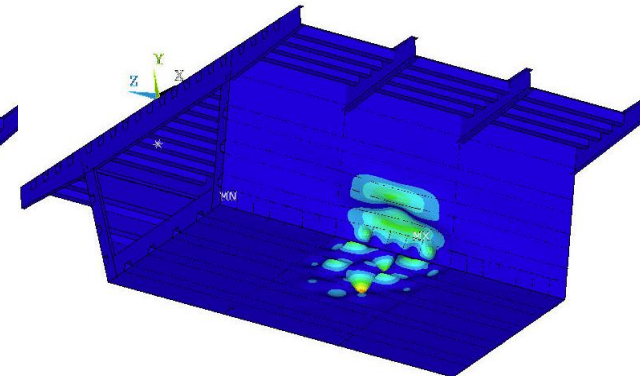
alsó övlemez lokális horpadása

Mode #3



gerinclemez lokális horpadása

Mode #4



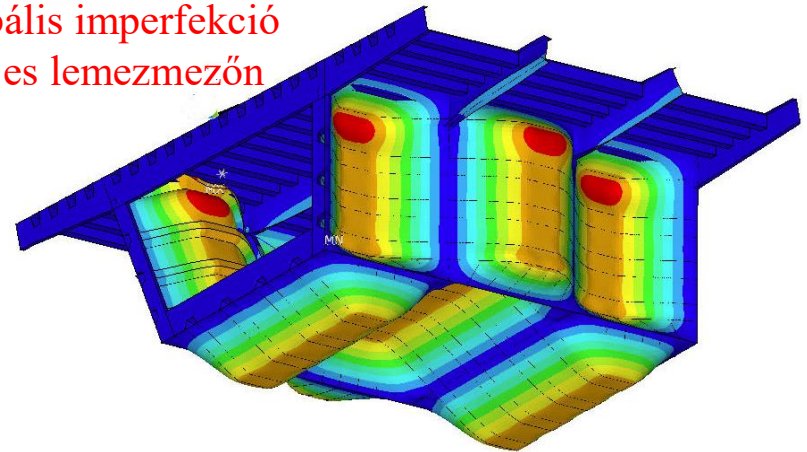
merevítőborda globális horpadása

Imperfekciók

1. Ekvivalens geometriai imperfekciók

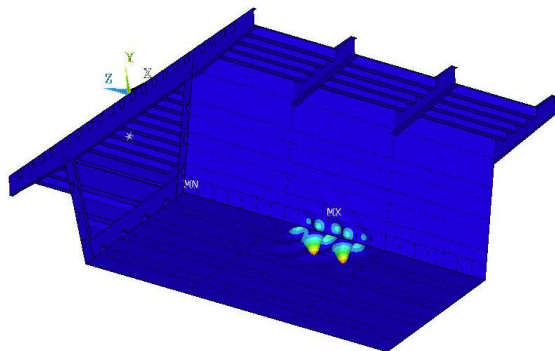
Maximális amplitúdó:
 $\min(a/400, b/400)$ ahol a és b are a vizsgált globális lemezmező hossza és szélessége.

Globális imperfekció a teljes lemezmezőn



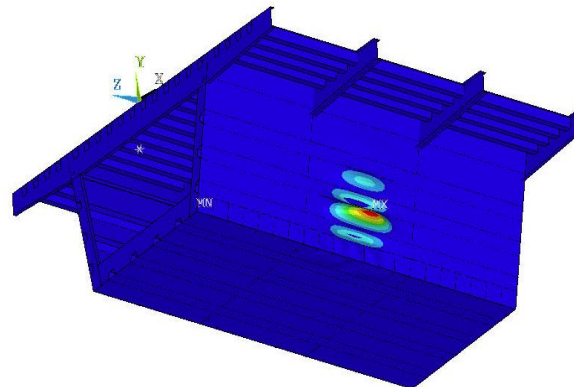
2. Sajátalak formájú imperfekciók

Mode #1



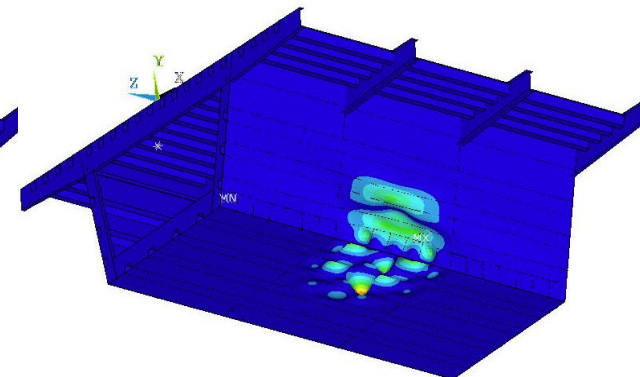
alsó övlemez lokális horpadása

Mode #3



gerinclemez lokális horpadása

Mode #4

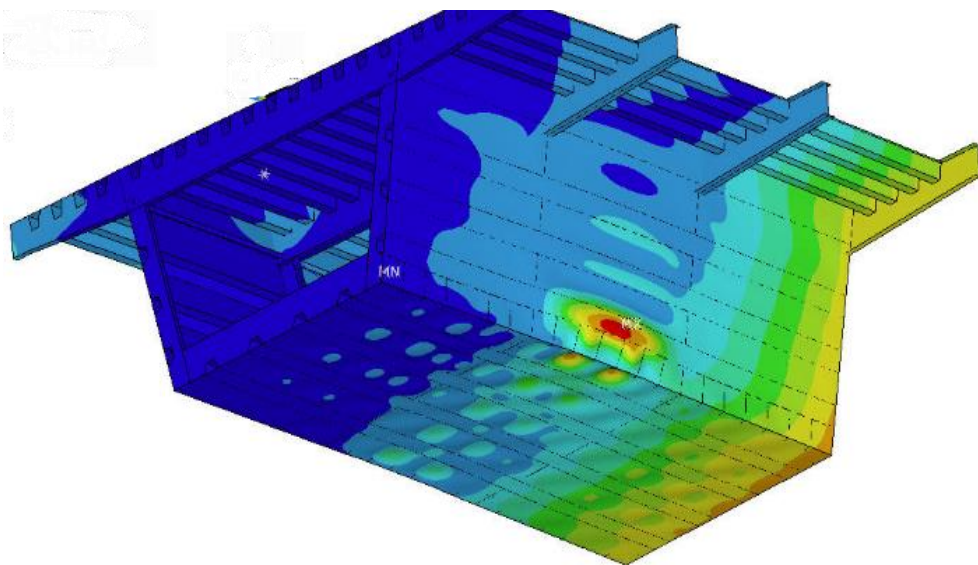


merevítőborda globális horpadása

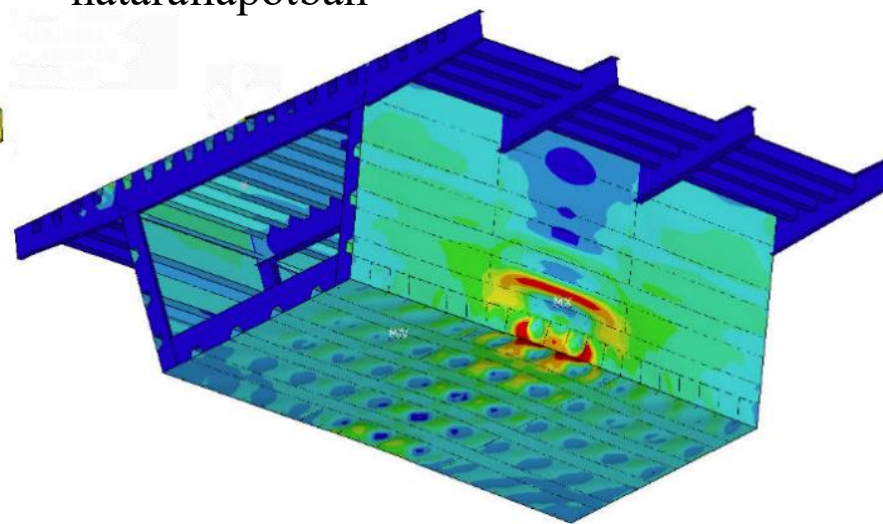
Tönkremeneteli alak

Tönkremeneteli alak és feszültségábra ellenőrizendő a számítás eredményeként, hogy várakozásoknak megfelelő-e?

Deformációs ábra



Összehasonlító feszültségek a teherbírési határállapotban



A számított tönkremeneteli alak a **gerinclemez globális és lokális horpadásának** kombináció a **fenéklemez lokális horpadásával**.

Minden tönkremenetelhez tartozó imperfekciót alkalmaztunk?



Modell verifikáció

(1) Verifikáció a következő lépésekből áll:

- a. Bemenő adatok érzékenységvizsgálata,
- b. Számítási eredmények mérnöki megítélése,
- c. Hálóérzékenység és konvergencia vizsgálat,
- d. Imperfekció érzékenység vizsgálata (csak numerikus szimuláció esetén).

(2) Mely lépéseket kell elvégezni, az analízis típustól függ.

Végeselem módszer alapú méretezés

numerikus tervezési számítások

Analízis, kiegészítő kézi ellenőrzéssel

- hálóérzékenység és konvergencia vizsgálat
- bemenő adatok érzékenységvizsgálata
- eredmények mérnöki megítélése

Közvetlen teherbírásvizsgálat

numerikus szimuláció

- bemenő adatok érzékenységvizsgálata
- eredmények mérnöki megítélése
- hálóérzékenység és konvergencia v.
- imperfekció érzékenység vizsgálat

Modell verifikáció

(1) Verifikáció a következő lépésekből áll:

- a. Bemenő adatok érzékenységvizsgálata, —————> csak ha érzékenység felmerül
- b. Számítási eredmények mérnöki megítélése, —————> igénybevételek, feszültségek és alakváltozások ellenőrzése szemlélet alapján
- c. Hálóérzékenység és konvergencia vizsgálat,
- ~~d. Imperfekció érzékenység vizsgálata (csak numerikus szimuláció esetén).~~

(2) Mely lépéseket kell elvégezni, az analízis típustól függ.

Végelem módszer alapú méretezés

numerikus tervezési számítások

Analízis, kiegészítő kézi ellenőrzéssel

- hálóérzékenység és konvergencia vizsgálat
- bemenő adatok érzékenységvizsgálata
- eredmények mérnöki megítélése

Közvetlen teherbírásvizsgálat

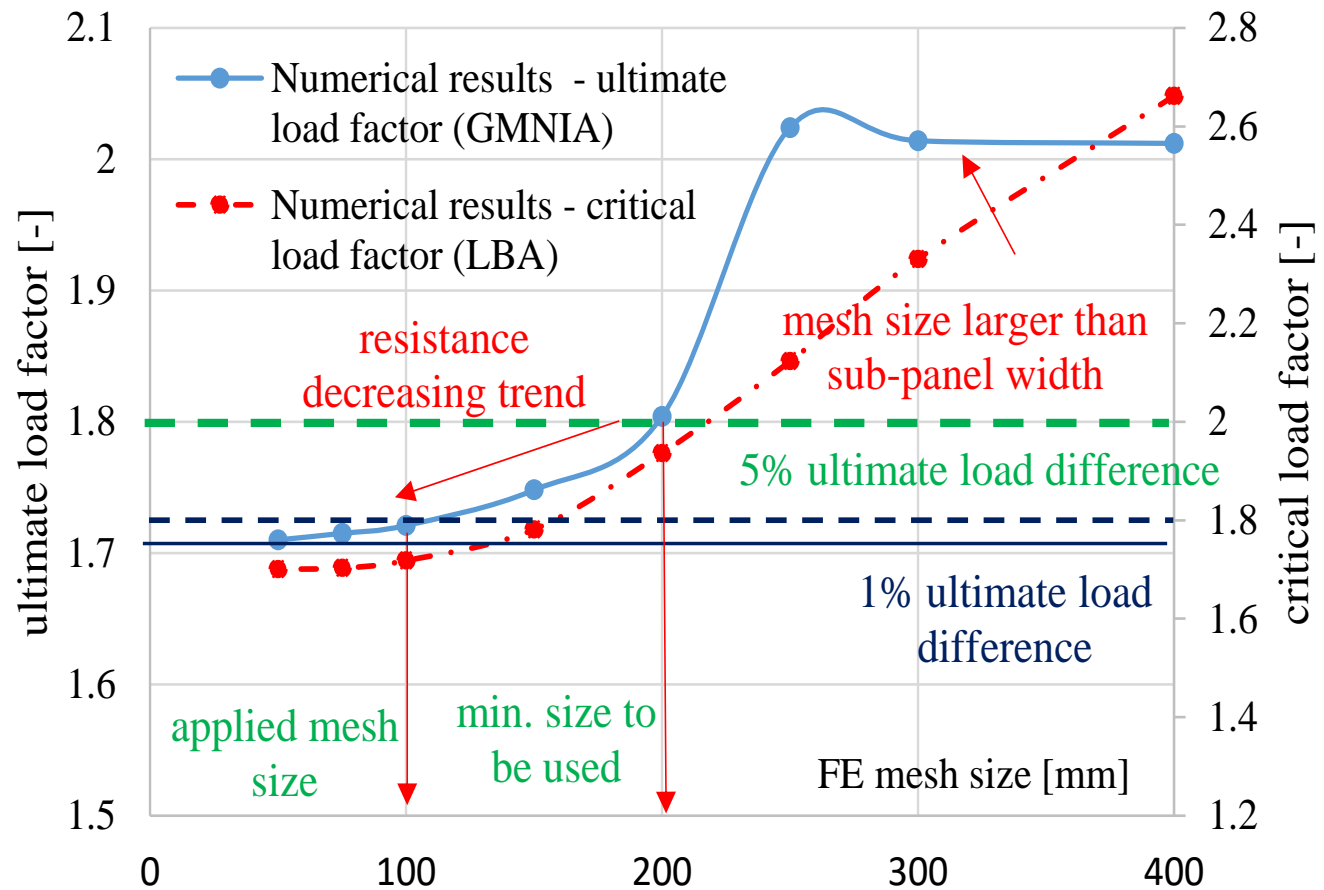
numerikus szimuláció

- bemenő adatok érzékenységvizsgálata
- eredmények mérnöki megítélése
- hálóérzékenység és konvergencia v.
- imperfekció érzékenység vizsgálat

Modell verifikáció

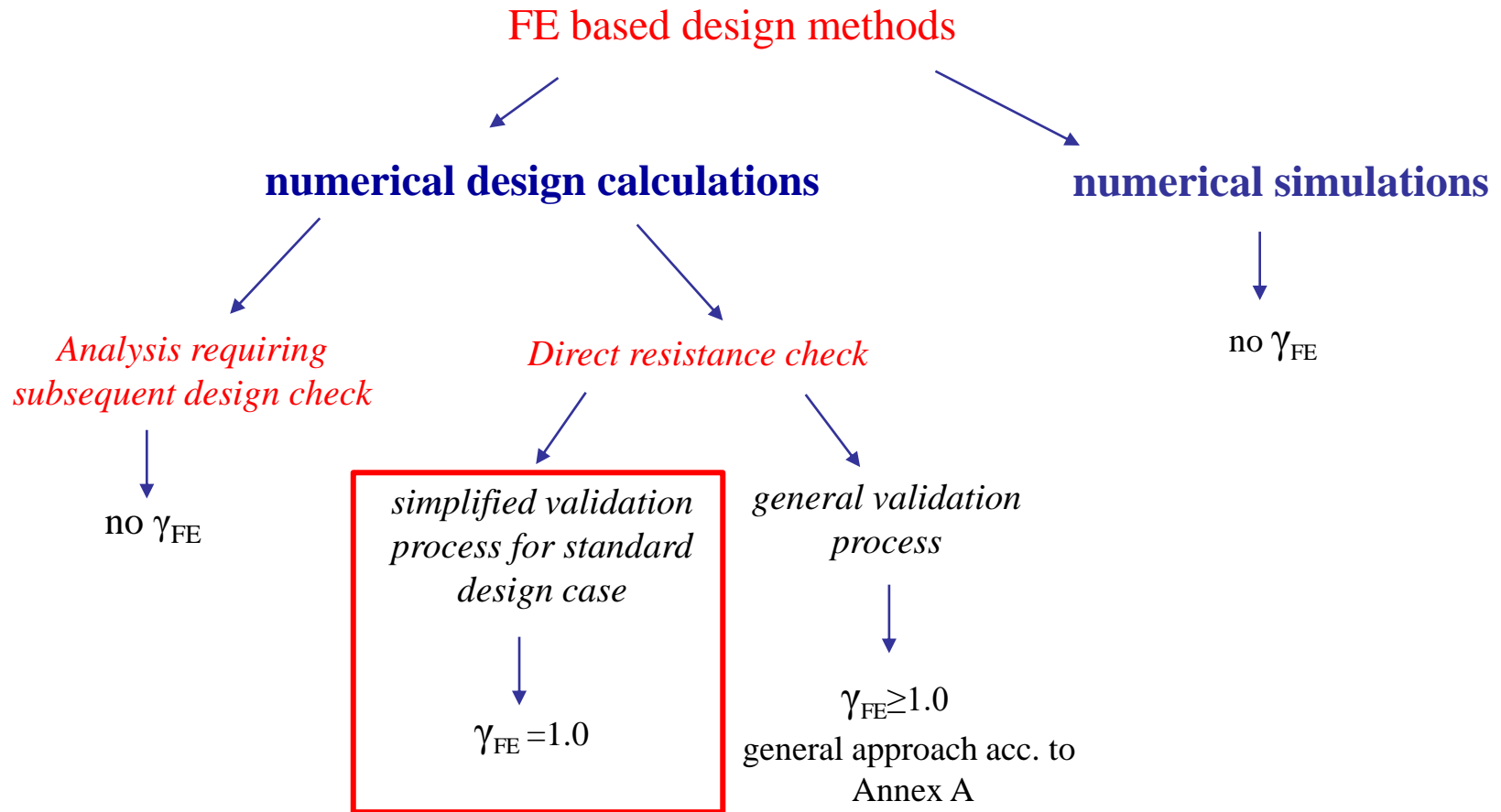
Háló érzékenység vizsgálat

1. LBA
2. GMNIA



Hálóméret meghatározása, mely eredménye 1%-ra vagy 5%-ra megközelíti a pontosnak ítélt eredményt.

Validáció a gyakorlatban



Imperfekció kombinációk

Imperfection ID	Global imperfections		Local imperfections	Ultimate load factor
	on bottom plate	on web plate		
Imp. 1	+1	+1	-	1.763
Imp. 2	+1	+1	+0,7	1.75
Imp. 3	+1	+1	-0,7	1.738
Imp. 4	+0,7	+0,7	+1	1.858
Imp. 5	+0,7	+0,7	-1	1.828
Imp. 6	+1	+1	+1	1.741
Imp. 7	+1	+1	-1	1.734
Imp. 8	-1	-1	-	1.987
Imp. 9	-1	-1	+0,7	1.864
Imp. 10	-1	-1	-0,7	1.94
Imp. 11	-0,7	-0,7	+1	1.824
Imp. 12	-0,7	-0,7	-1	1.911
Imp. 13	-1	-1	+1	1.812
Imp. 14	-1	-1	-1	1.936

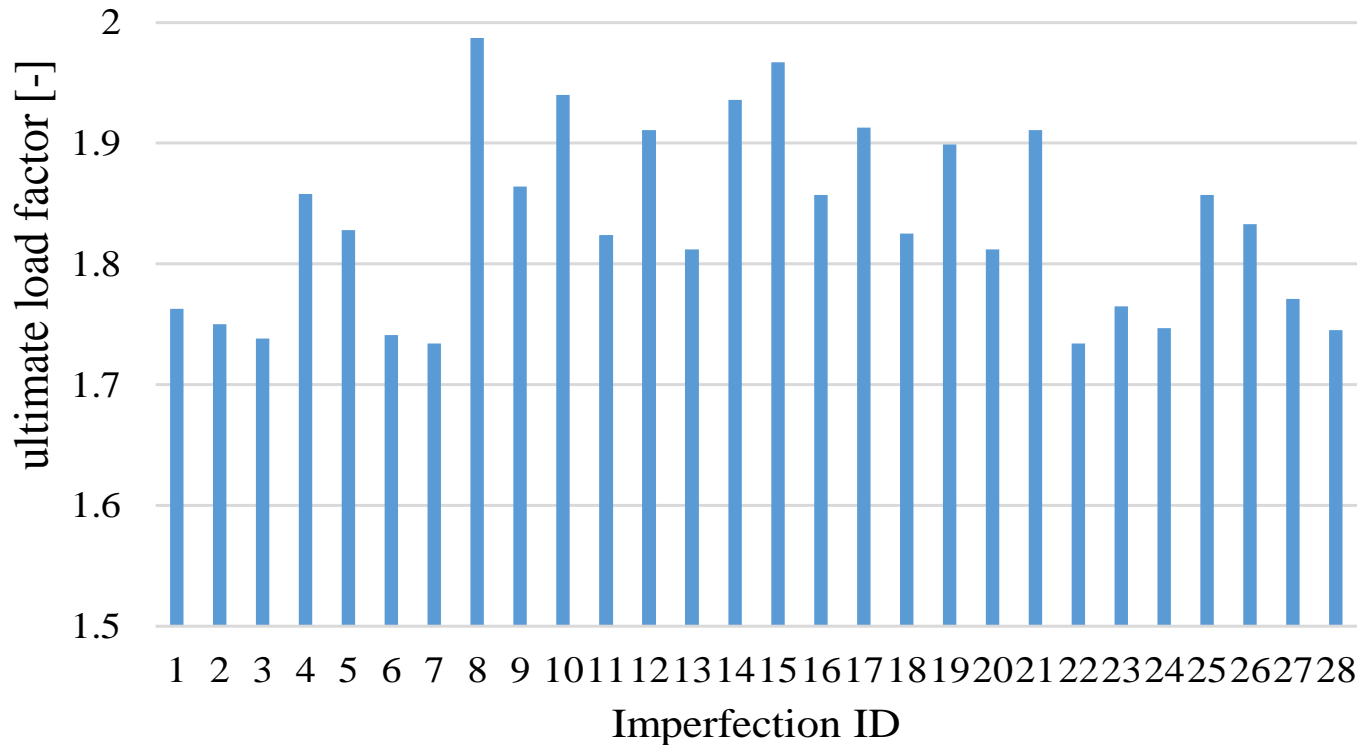
Imperfection ID	Global imperfections		Local imperfections	Ultimate load factor
	on bottom plate	on web plate		
Imp. 15	+1	-1	-	1.967
Imp. 16	+1	-1	+0,7	1.857
Imp. 17	+1	-1	-0,7	1.913
Imp. 18	+0,7	-0,7	+1	1.825
Imp. 19	+0,7	-0,7	-1	1.899
Imp. 20	+1	-1	+1	1.812
Imp. 21	+1	-1	-1	1.911
Imp. 22	-1	+1	-	1.734
Imp. 23	-1	+1	+0,7	1.765
Imp. 24	-1	+1	-0,7	1.747
Imp. 25	-0,7	+0,7	+1	1.857
Imp. 26	-0,7	+0,7	-1	1.833
Imp. 27	-1	+1	+1	1.771
Imp. 28	-1	+1	-1	1.745

Három különböző kézzel definiált imperfekció van, melyeket kombinálni kell.

Mindig 1 kiemelt imperfekció és többi egyidejű imperfekció -> hasonlóan a teherkombinációkhoz.

Mindegyik imperfekciót a kombinációban + és - előjellel is figyelembe kell venni (nem tudjuk melyik lesz kedvezőtlenebb)

Imperfekció kombinációk eredménye



Imperfekció kombinációknak nagy hatása van a teherbírásra, ebben az esetben a min/max közötti különbség 14,5%.

Legkisebb teherszorzó 1.738, melyet figyelembe kell venni az ellenőrzésnél.

Globális imperfekció iránya kulcsfontosságú, ezért minden esetben mindkét irányú imperfekcióval is kell számításokat végezni.

Imperfekció kombinációk eredménye

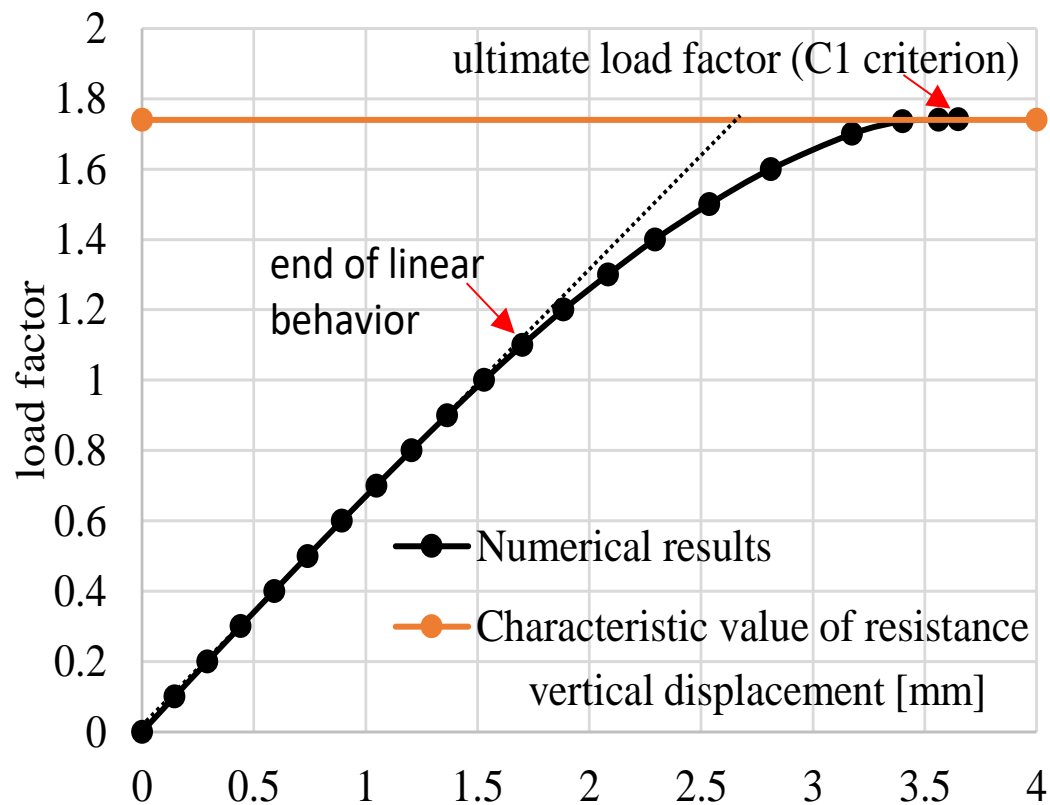
Imperfection ID	Global imperfections		Local imperfections	Ultimate load factor
	on bottom plate	on web plate		
Imp. 1	+1	+1	-	1.763
Imp. 2	+1	+1	+0,7	1.75
Imp. 3	+1	+1	-0,7	1.738
Imp. 4	+0,7	+0,7	+1	1.858
Imp. 5	+0,7	+0,7	-1	1.828
Imp. 6	+1	+1	+1	1.741
Imp. 7	+1	+1	-1	1.734
Imp. 8	-1	-1	-	1.987
Imp. 9	-1	-1	+0,7	1.864
Imp. 10	-1	-1	-0,7	1.94
Imp. 11	-0,7	-0,7	+1	1.824
Imp. 12	-0,7	-0,7	-1	1.911
Imp. 13	-1	-1	+1	1.812
Imp. 14	-1	-1	-1	1.936

Imperfection ID	Global imperfections		Local imperfections	Ultimate load factor
	on bottom plate	on web plate		
Imp. 15	+1	-1	-	1.967
Imp. 16	+1	-1	+0,7	1.857
Imp. 17	+1	-1	-0,7	1.913
Imp. 18	+0,7	-0,7	+1	1.825
Imp. 19	+0,7	-0,7	-1	1.899
Imp. 20	+1	-1	+1	1.812
Imp. 21	+1	-1	-1	1.911
Imp. 22	-1	+1	-	1.734
Imp. 23	-1	+1	+0,7	1.765
Imp. 24	-1	+1	-0,7	1.747
Imp. 25	-0,7	+0,7	+1	1.857
Imp. 26	-0,7	+0,7	-1	1.833
Imp. 27	-1	+1	+1	1.771
Imp. 28	-1	+1	-1	1.745

Ha elhagynánk a kombinációs tényezőt (0.7) sokkal csökkenteni lehet a kombinációk számát (Imp. 6-7, 13-14, 20-21, 27-28).

Jelentős hatása a vizsgált esetben nem lenne, nem vezet jelentősen gazdaságtalan megoldásra.

Tervezési ellenállás meghatározása



Karakterisztikus teherbírás ($R_{b,k}$)

$$R_{b,k} = \frac{R_{GMNIA}}{\gamma_{FE}} = \frac{1.738}{1.0} = 1.738$$

Tervezési teherbírás ($R_{b,d}$)

$$R_{b,d} = \frac{R_{b,k}}{\gamma_{M1}} = \frac{1.738}{1.10} = 1.58$$

**Szerkezet kihasználtsága 63%
teherbírással szemben.**

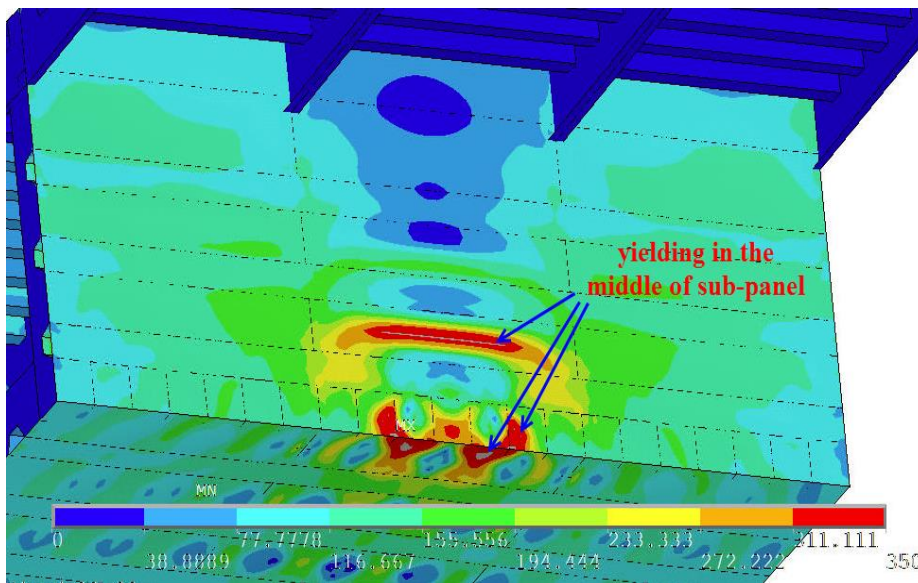
**Rugalmas viselkedési
követelmény is teljesül, mely
hidaknál kötelező.**

Anyagmodellek hatása

Három különböző anyagmodellel számítás, azonos imperfekciókkal.

material model	perfectly plastic without strain hardening	perfectly plastic with a nominal plateau slope for numerical stability	quad-linear material model with strain hardening
ultimate load factor	1.737	1.739	1.737

Nincs jelentős teherbírás befolyásoló hatása.



Ok: tönkremeneteli mód lemezhorpadás, melynél miután a szélső szál eléri a folyáshatárt, nincs jelentős felkeményedésből származó teherbírásnövekedés.



Nem általános érvényű megállapítás, erre a vizsgált szerkezetre és a vizsgált tönkremeneteli módra igaz.

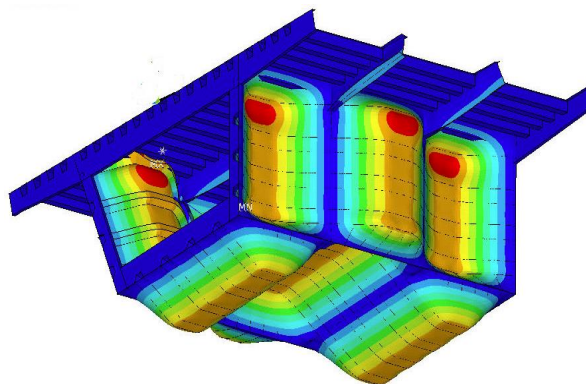
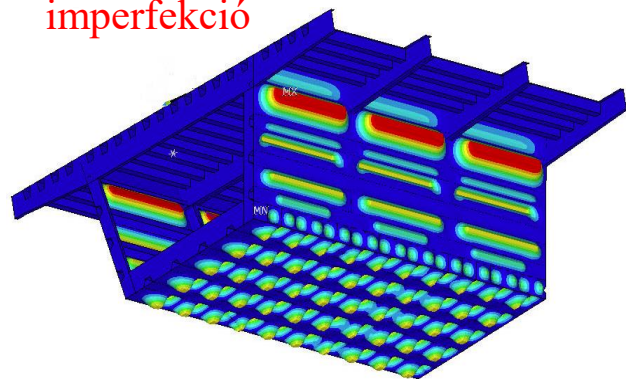
Imperfekció definiálási mód hatása

1. Ekvivalens geometriai imperfekciók

→ Min. teherszorzó **1.738**

Lokális imperfekció

Globális imperfekció



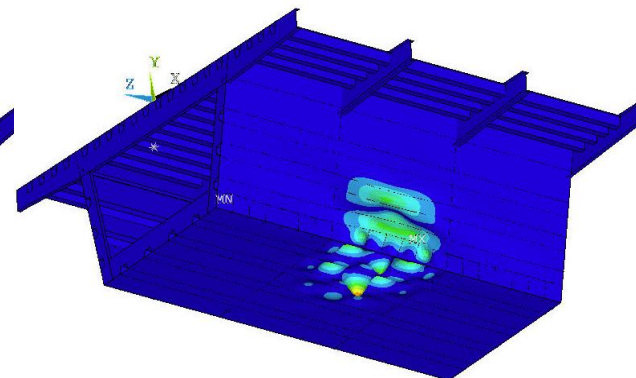
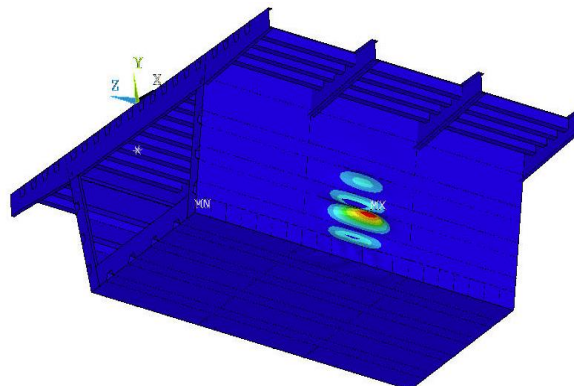
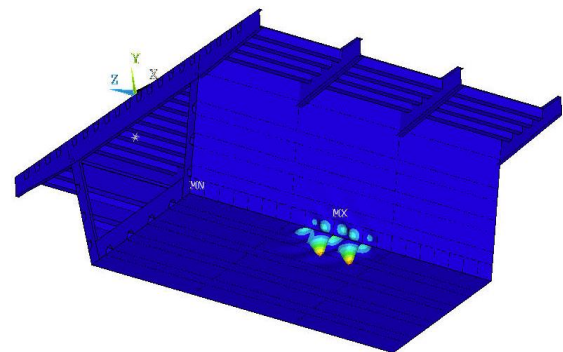
*Ha mind a három sajátalak formájú imperfekció együttesen alkalmazva van, legkisebb teherszorzó értéke: **1.583**.
(biztonság oldalán van)*

2. Sajátalak formájú imperfekciók

Mode #1

Mode #3

Mode #4



alsó övlemez lokális horpadása

gerinclemez lokális horpadása

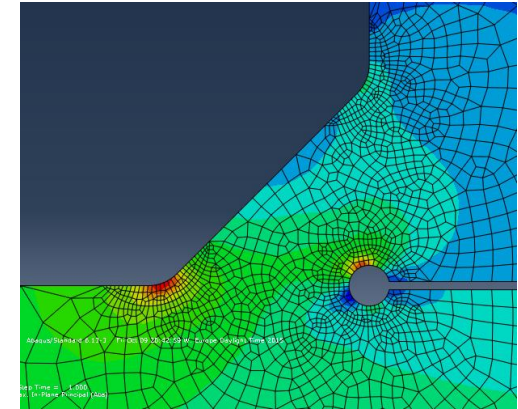
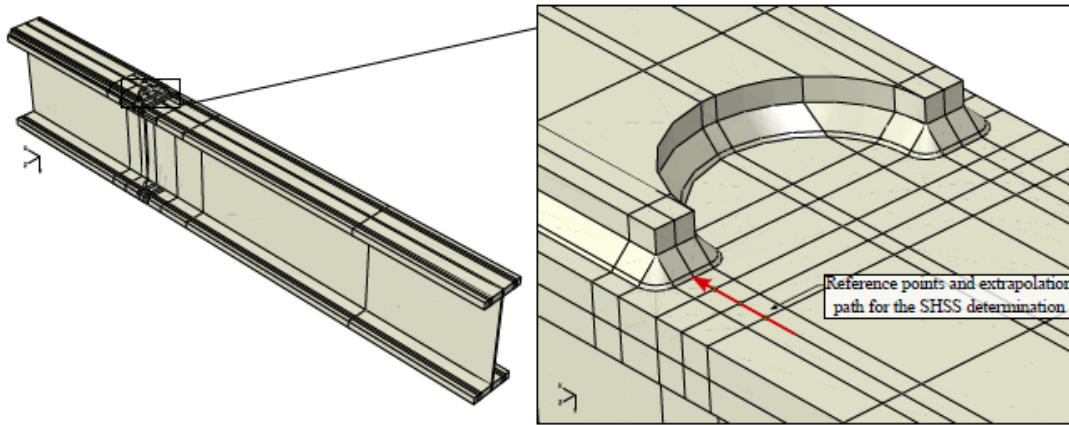
merevítőborda globális horpadása

Tervezési mintapéldák

1. Rugalmas számítás, feszültségellenőrzés – feszültségkoncentráció vizsgálata
2. Képlékeny számítás – korlátolatlan folyás és képlékeny törés határállapota
3. Lemezes szerkezetek stabilitásvizsgálata
4. Fáradásvizsgálat

Numerikus modell alapú fáradásvizsgálat

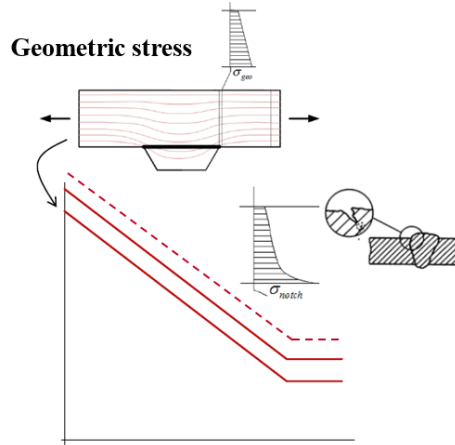
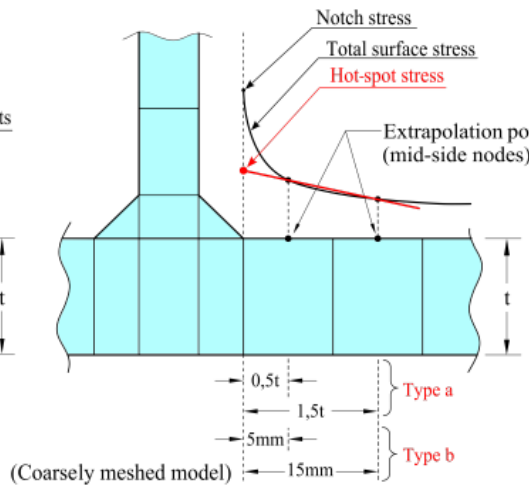
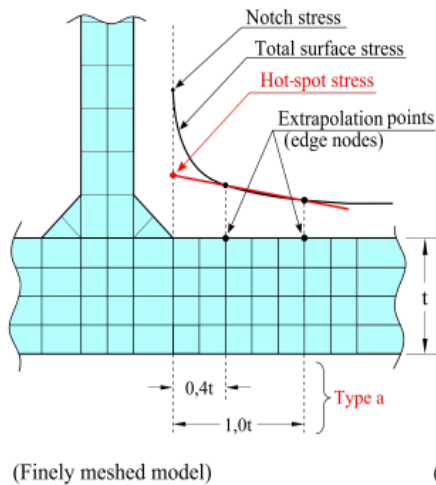
Fejlett modellszintek fáradásvizsgálati alkalmazása



Numerikus modellhez kapcsolódó eljárások:

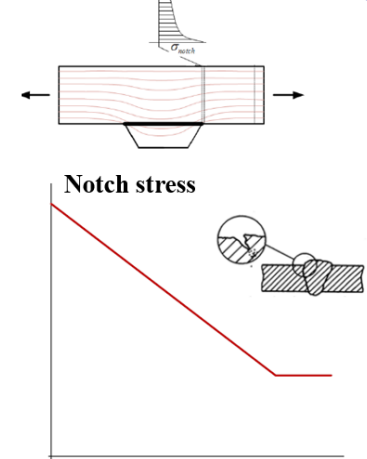
Geometriai feszültség

Notch feszültség



The Hot-spot method

The effect of macro geometry is transferred to the load-effect side



The effective notch stress method

Both macro & micro effects are accounted for on the load-effect side

Feszültség meghatározás módszerei

- ◆ Nominális feszültség: szerkezeti részlet (kézi számítás szintje)

- ◆ Geometriai feszültség: szerkezeti pont

tartalmazza a "macro" geometriai változások (szerkezeti elem geometriája) hatását = feszültség koncentrációt

- ◆ Notch feszültség: szerkezeti pont

Tartalmazza a „macro” és „micro” geometriai változások hatását is (szerkezeti elem és varrat alak geometriája)

- ◆ S-N görbe tartalmazza:

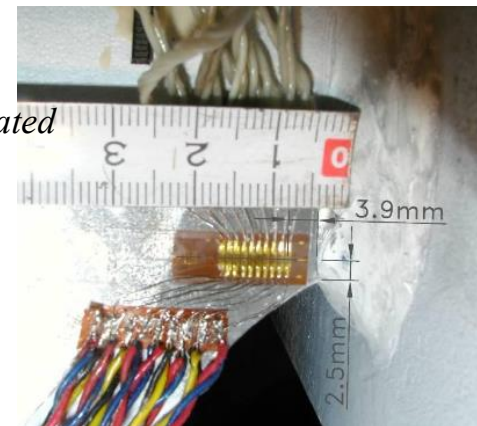
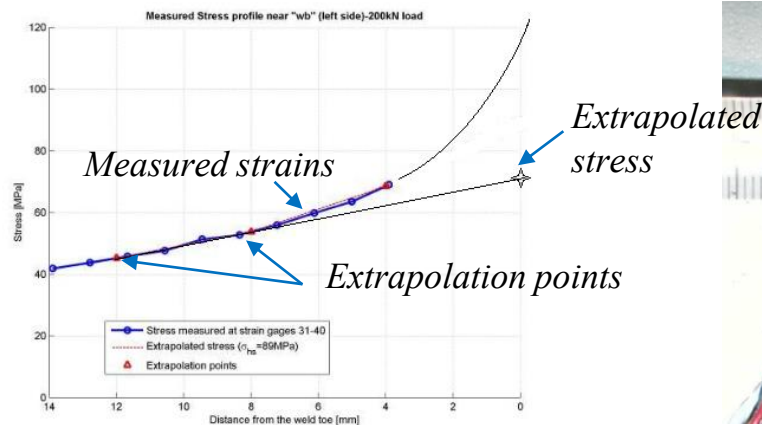
- ◆ Szerkezeti részlet: varratgeometria miatti feszültségkoncentrációt; sajátfeszültségek hatását; hegesztési módszer hatását; mikro/makro repedések alakját, számát, nagyságát; terhelési irányt.

- ◆ Szerkezeti pont: varratgeometria miatti mikro/makro hibákat, lokális imperfekciókat, sajátfeszültségeket

Lehetőség, nem kötelező

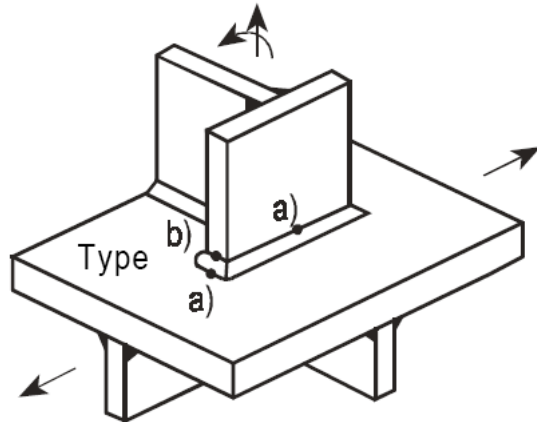
Hot-spot módszer (geometriai feszültség)

- 1960-as években fejlesztették ki, cső-cső kapcsolatok vizsgálatára
- Eredetileg a nominális feszültség alapú eljárás kiterjesztése volt feszültségmérések alapján
- Megadott szabályok szerint kiextrapolált feszültséglegzés alapú vizsgálat



Hot-spot módszer jellemzően varratszéltől kiinduló, alapanyagban terjedő repedések vizsgálatára alkalmazható.

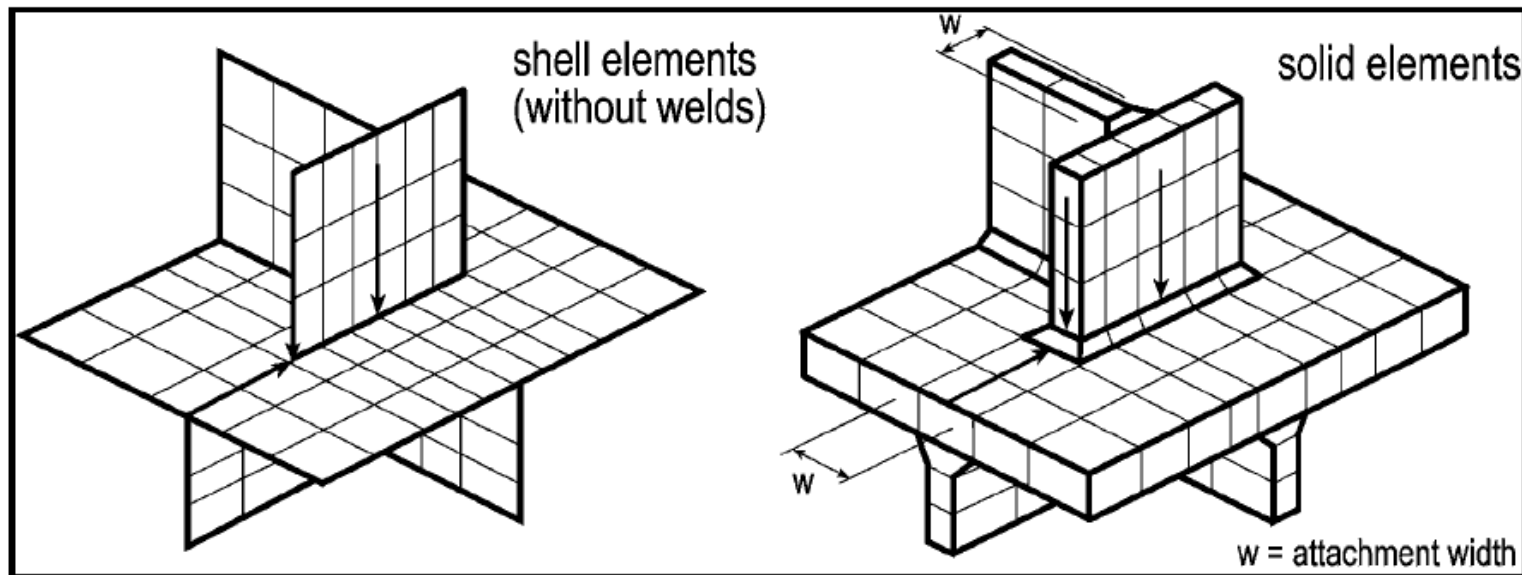
Veszélyes pont modellezése és osztályozása



Héjmodell

Testmodell

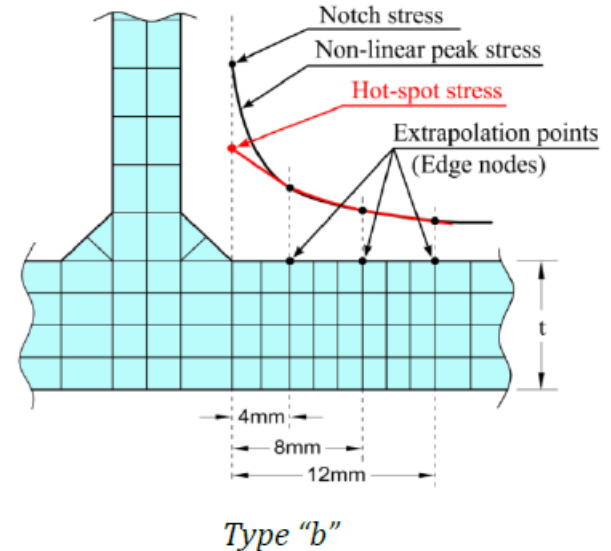
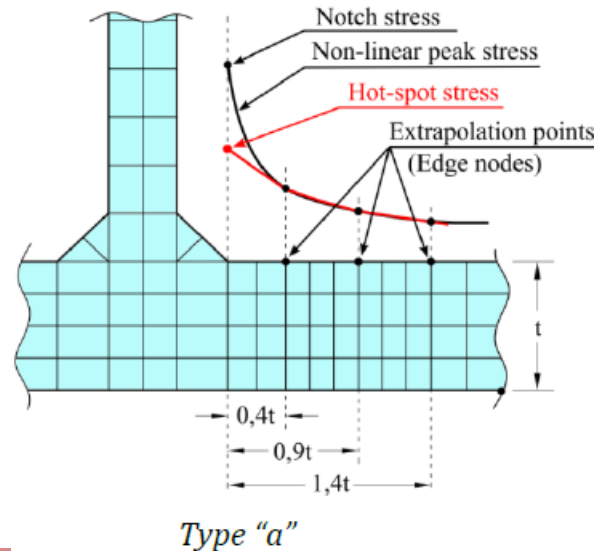
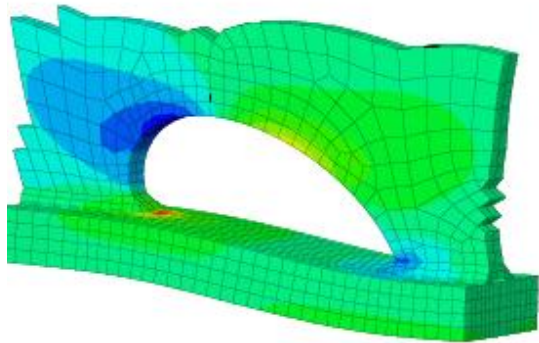
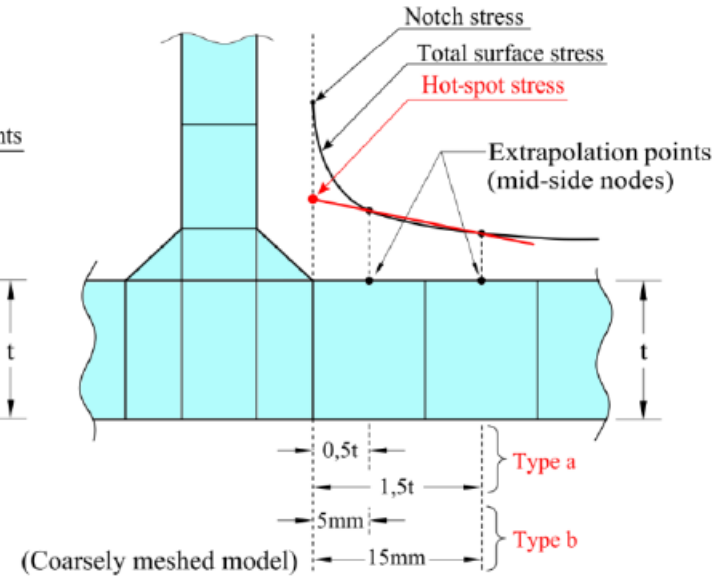
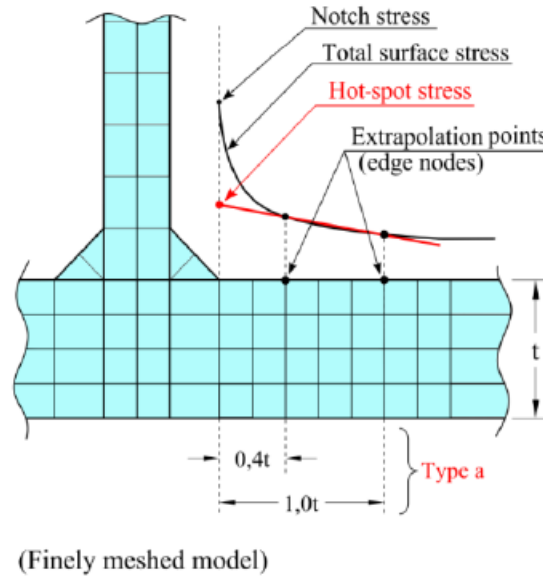
Varrat típus: a) vagy b) (felület vagy él)



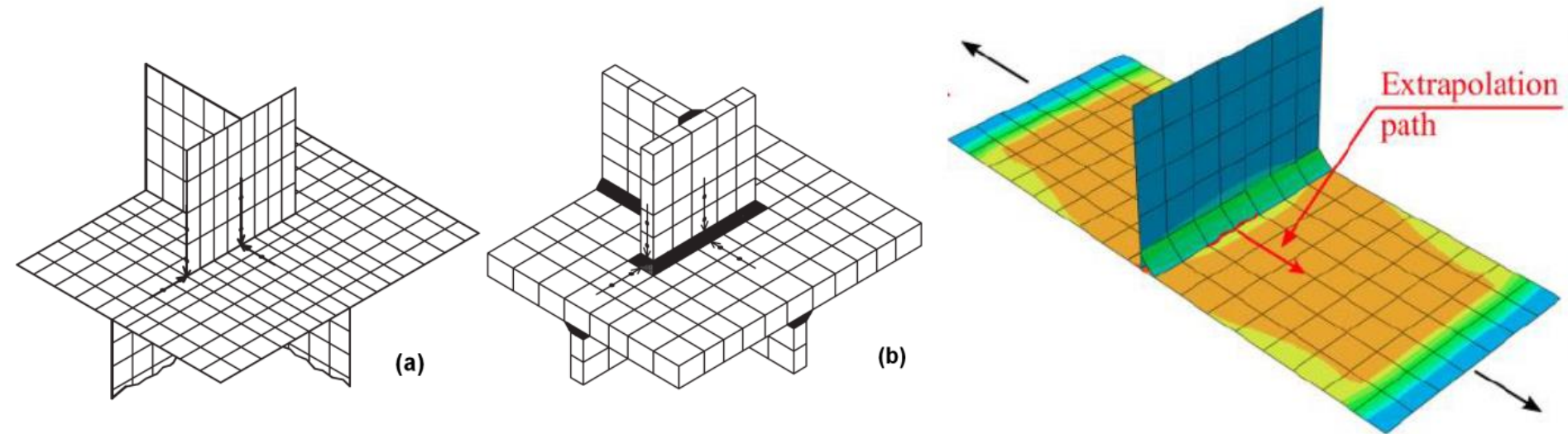
Feszültség extrapoláció

4 alkalmazási lehetőség:

- sűrű, vagy ritka VEM háló
- varrat „a” vagy „b”
- lineáris vagy kvadratikus extrapoláció



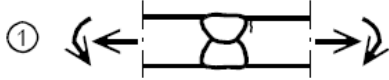
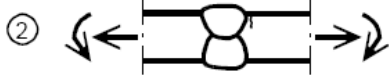
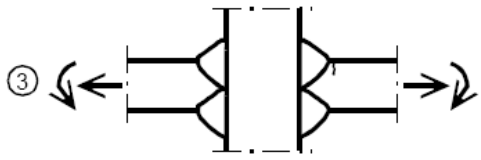
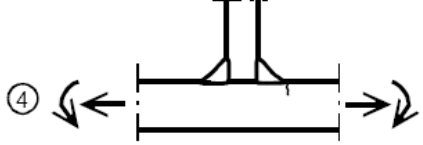
Feszültség extrapoláció



Type of hot spots point	Linear extrapolation		Quadratic extrapolation
	Fine mesh	Coarse mesh	Fine mesh
Type "a"	0,4t and 1,0t	0,5t and 1,5t	0,4t, 0,9t and 1,4t
	$1,67\sigma_{0,4t} - 0,67\sigma_{1,0t}$	$1,5\sigma_{0,5t} - 0,5\sigma_{1,5t}$	$2,52\sigma_{0,4t} - 2,24\sigma_{0,9t} + 0,72\sigma_{1,4t}$
Type "b"	--	5mm and 15mm	4, 8 and 12mm
	--	$1,5\sigma_{5mm} - 0,5\sigma_{15mm}$	$3\sigma_{4mm} - 3\sigma_{8mm} + \sigma_{12mm}$

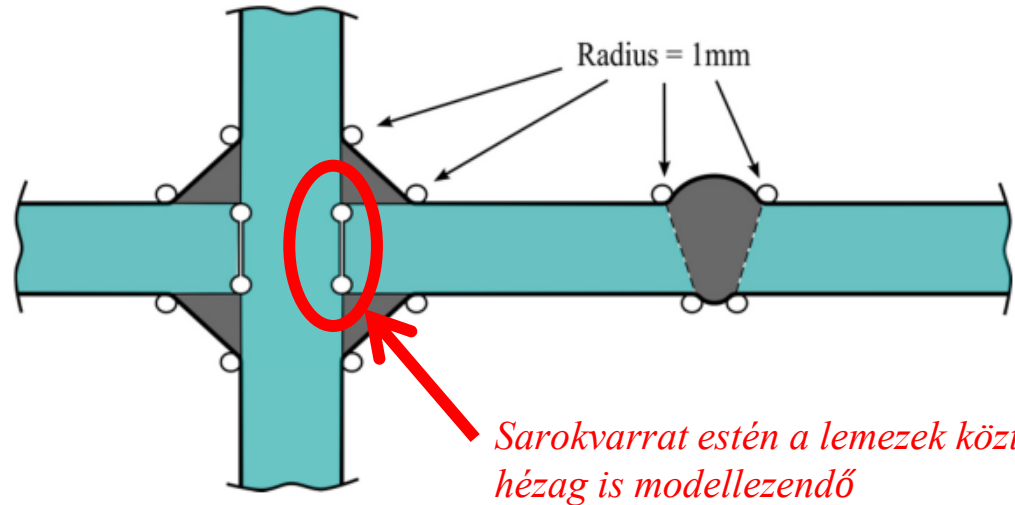
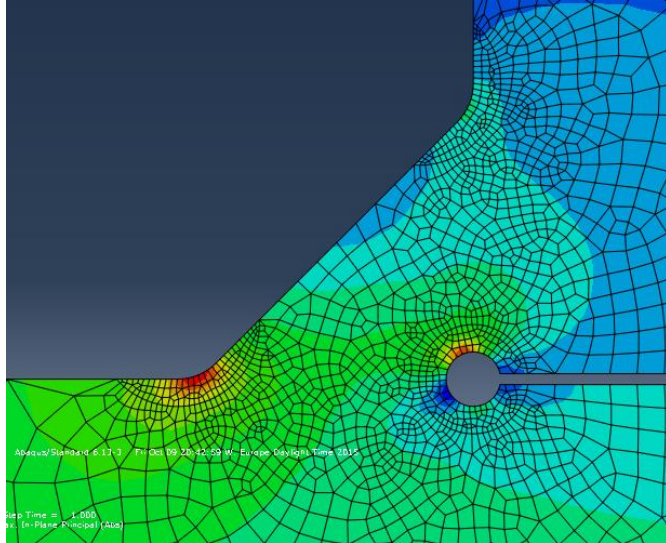


Geometriai feszültségek fáradási osztályai

Detail category	Constructional detail	Description	Requirements
112		1) Full penetration butt joint.	1) - All welds ground flush to plate surface parallel to direction of the arrow. - Weld run-on and run-off pieces to be used and subsequently removed, plate edges to be ground flush in direction of stress. - Welded from both sides, checked by NDT. - For misalignment see NOTE 1.
100		2) Full penetration butt joint.	2) - Weld not ground flush - Weld run-on and run-off pieces to be used and subsequently removed, plate edges to be ground flush in direction of stress. - Welded from both sides. - For misalignment see NOTE 1.
100		3) Cruciform joint with full penetration K-butt welds.	3) - Weld toe angle $\leq 60^\circ$. - For misalignment see NOTE 1.
100		4) Non load-carrying fillet welds.	4) - Weld toe angle $\leq 60^\circ$. - See also NOTE 2.

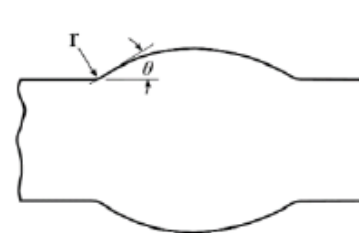
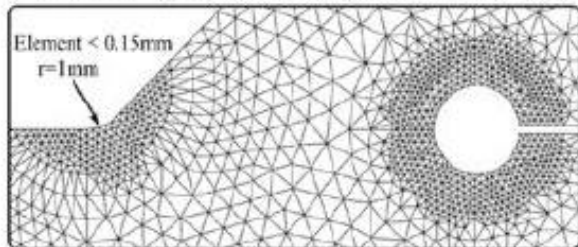
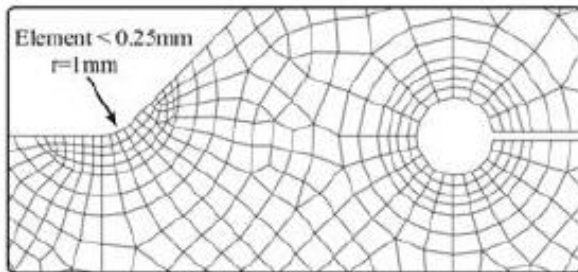
Effective notch feszültség alapú eljárás

- Modellezési megfontolások:
 - Nagyon pontos geometriai modellezés
 - Megfelelően finom FE háló
 - Varratgyök és varrattalp repedés is modellezhető

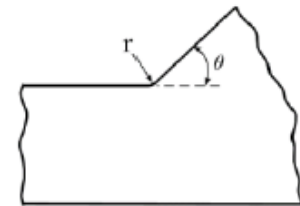


Effective notch feszültség alapú eljárás

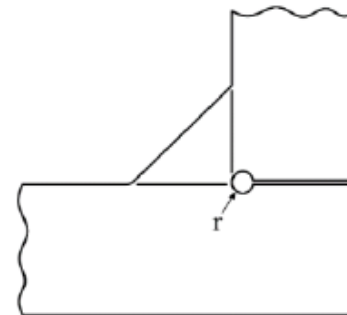
- FE elemméret meghatározása
- Lekerekítés 1 mm



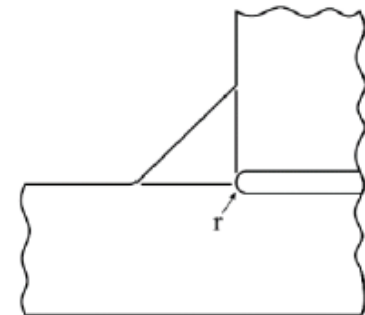
(a) Rounding of a butt weld



(b) Rounding of a fillet weld



(c) Rounding weld root by a keyhole



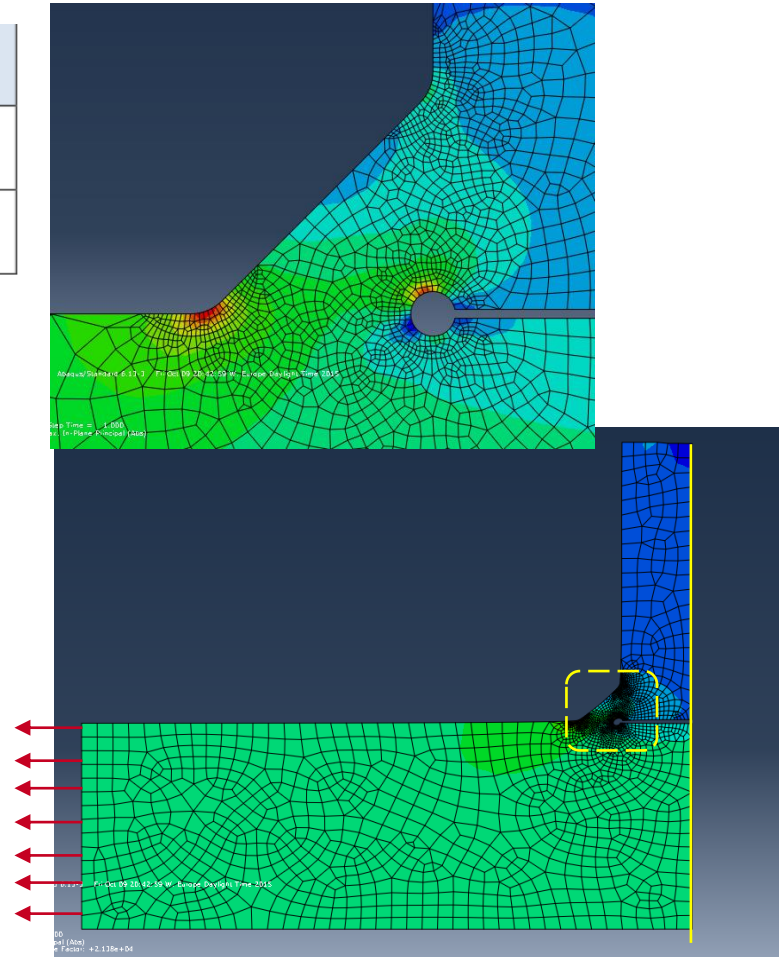
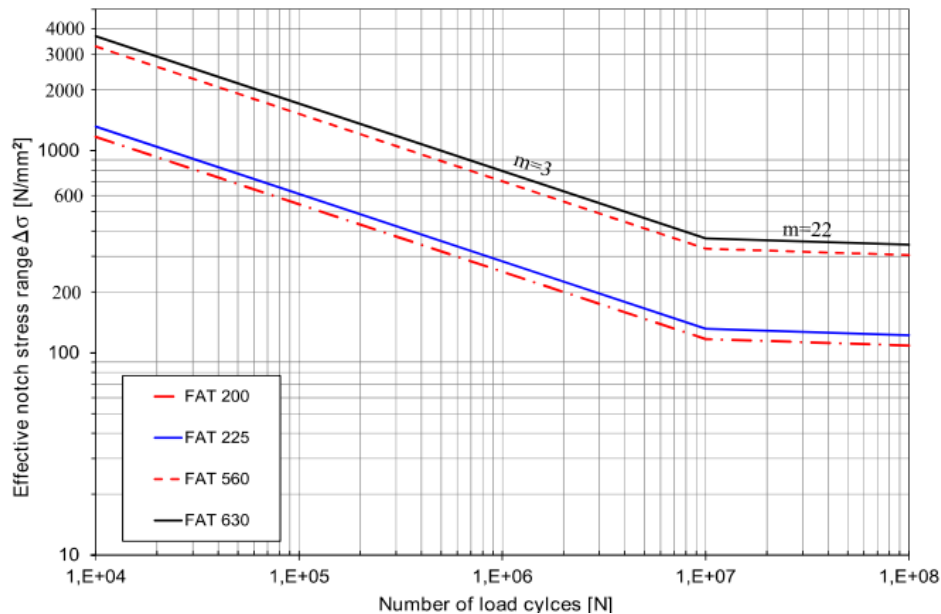
(d) Rounding weld root by an U-shape

Element type		<i>Element size</i>
Hexahedral	Quadratic	0.25mm
	Linear	0.15mm
Tetrahedral	Quadratic	0.15mm

Effective notch feszültség alapú eljárás

- Ellenállás oldal – S-N görbe

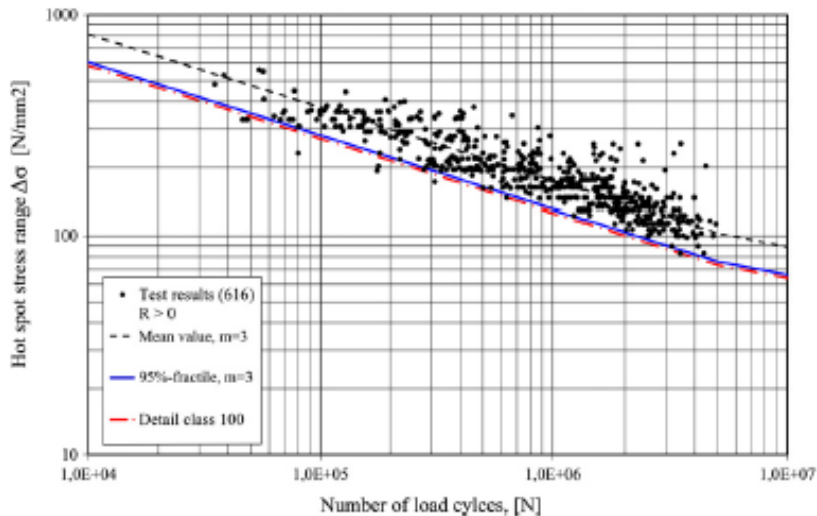
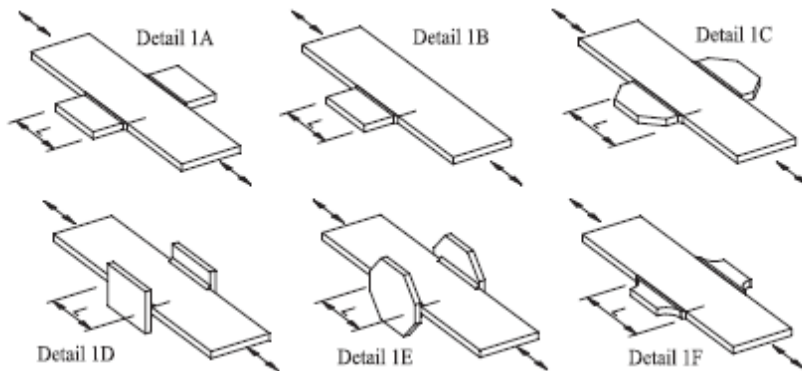
Reference radius	Principal stress	von Mises stress
$r = 1,0\text{mm}$	FAT225	FAT200
$r = 0.05\text{mm}$	FAT630	FAT560



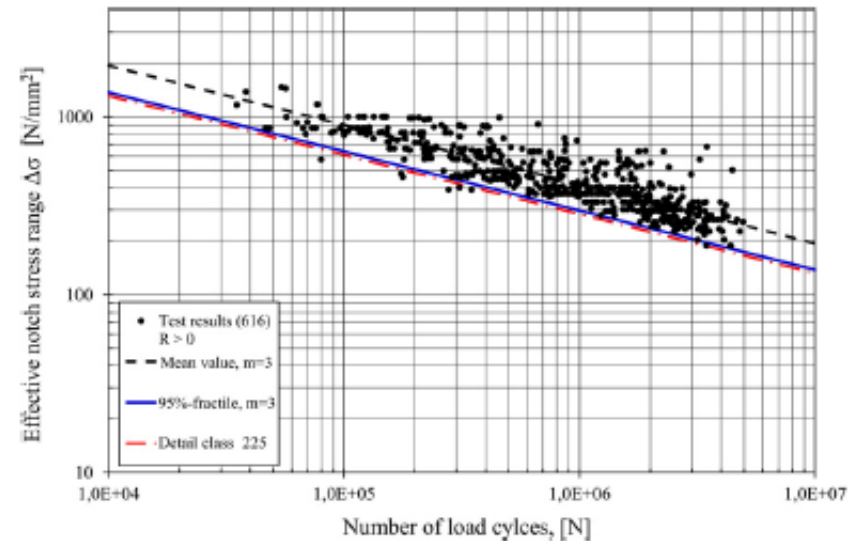
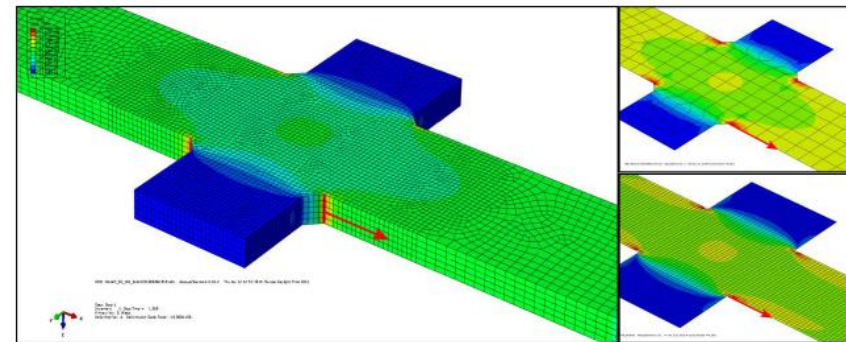
Összehasonlító példák - 1

- Két módszer összehasonlítása, validációja

Hot spot feszültség módszere / FAT100



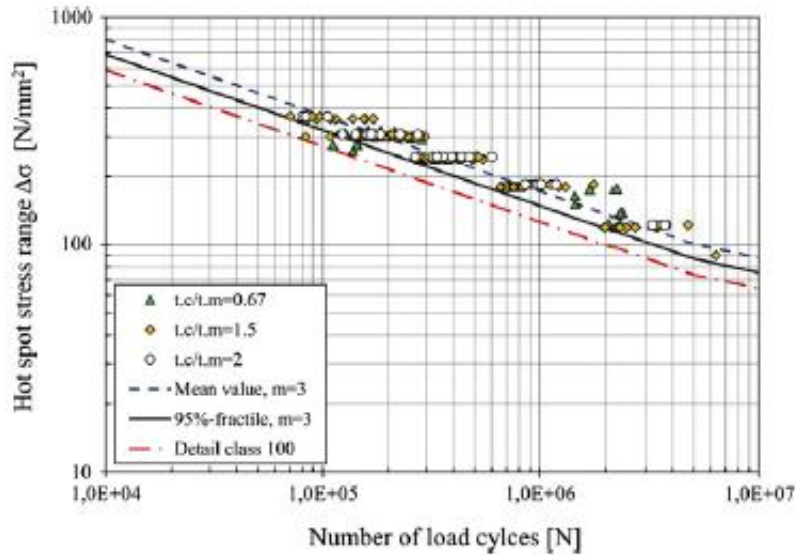
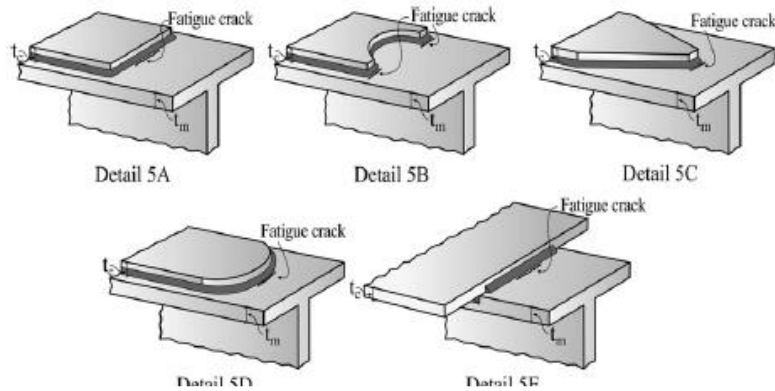
Effektív notch feszültség módszere / FAT225



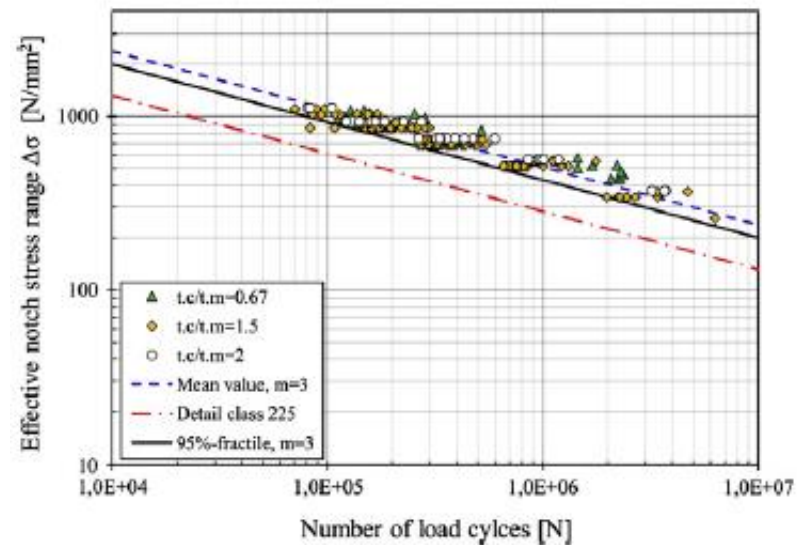
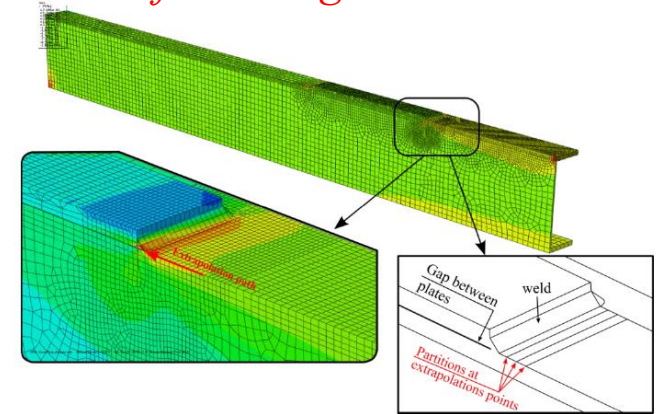
Összehasonlító példák - 2

- Két módszer összehasonlítása, validációja

Hot spot feszültség módszere / FAT100

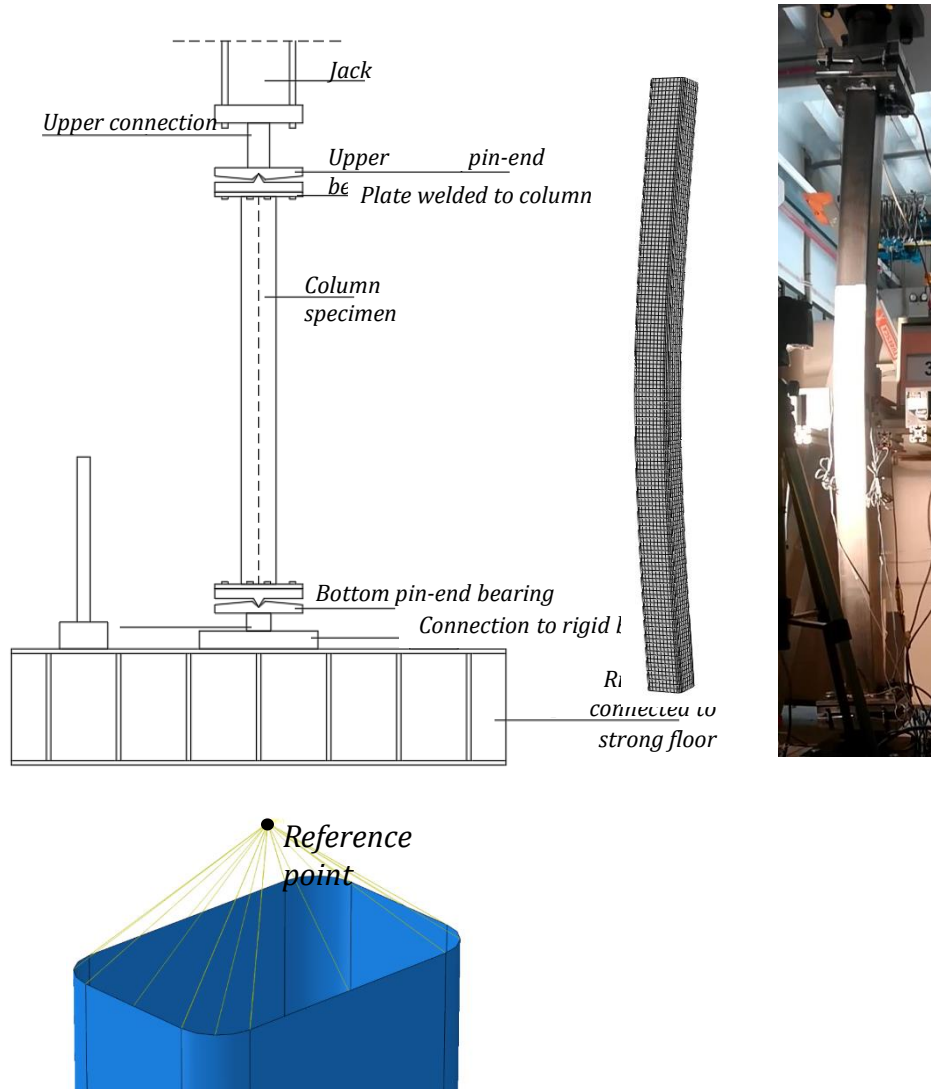


Effektív notch feszültség módszere / FAT225

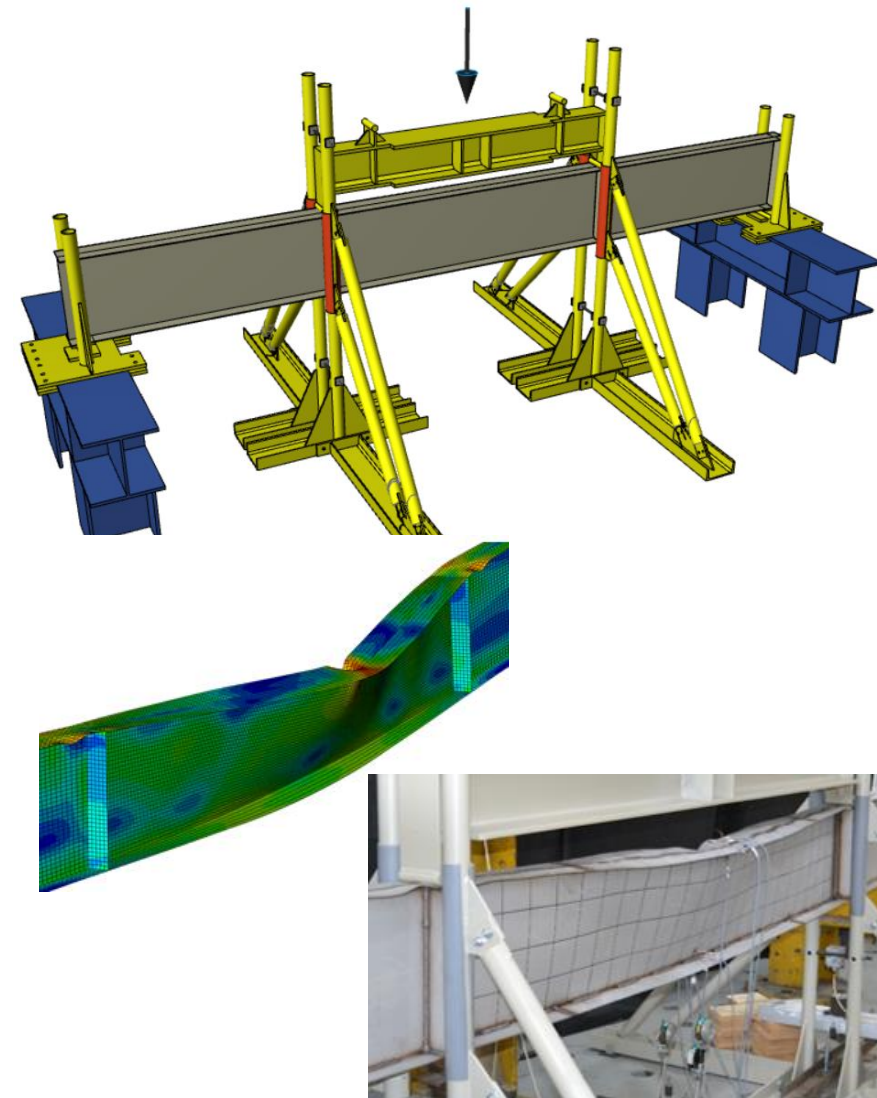


Validációs példák

Oszlop méretezés GMNIA alapokon

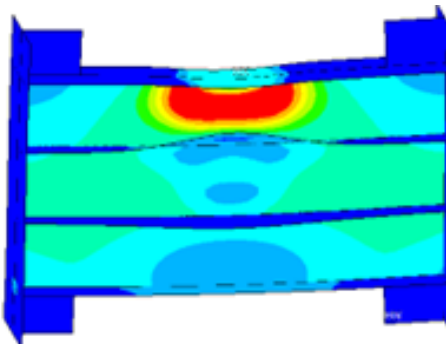
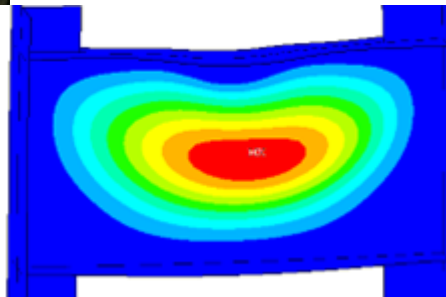
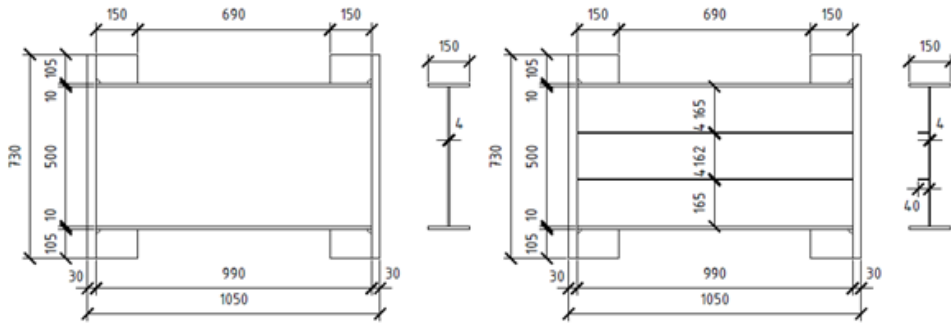


Gerenda kifordulás GMNIA alapokon

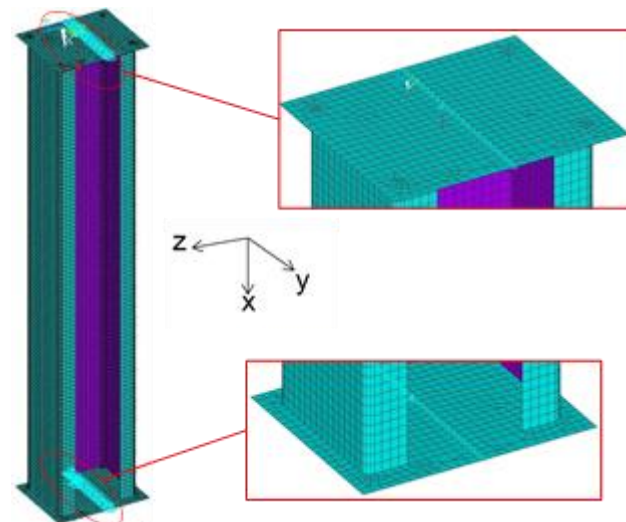
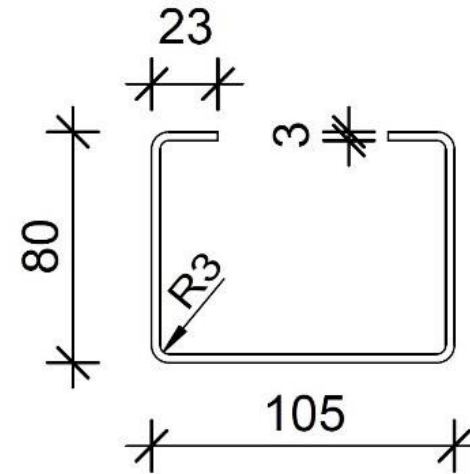


Validációs példák

Beroppanás GMNIA alapokon

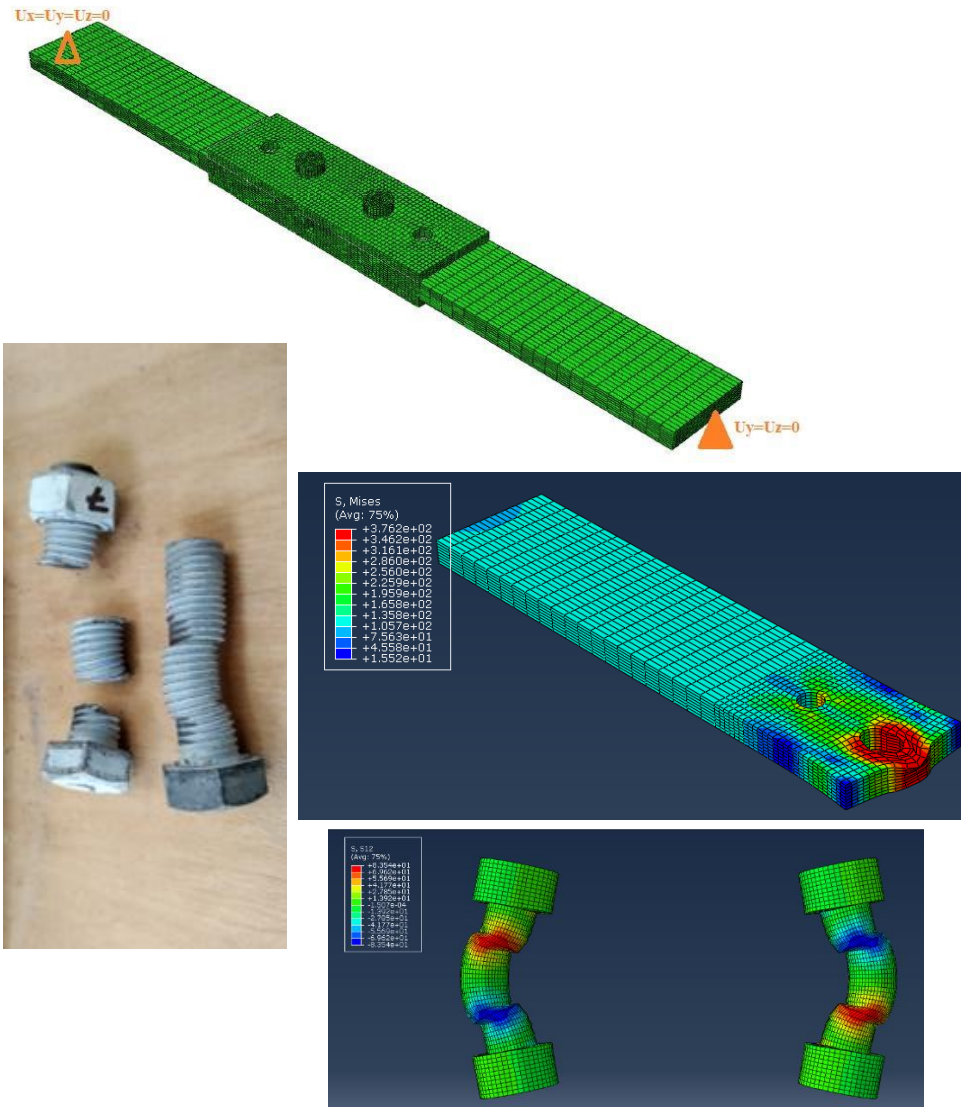


Vékonyfalú szelvény kihajlás GMNIA alapokon

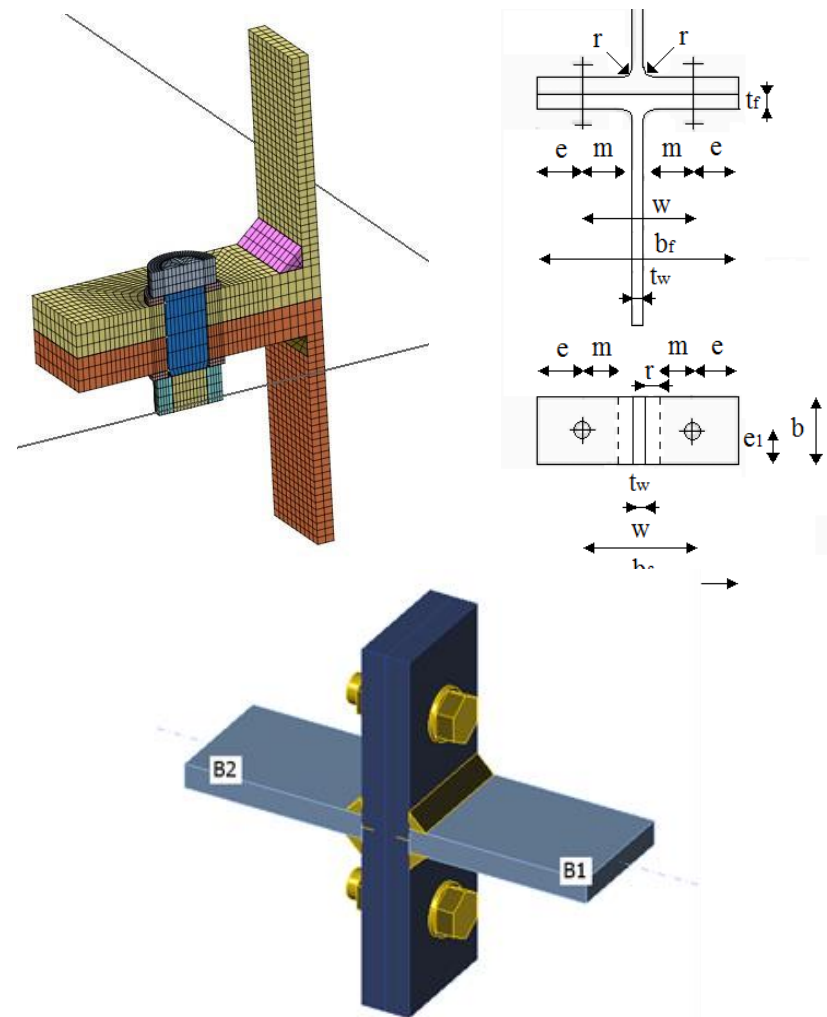


Validációs példák

Csavarozott kapcsolat nyírásra

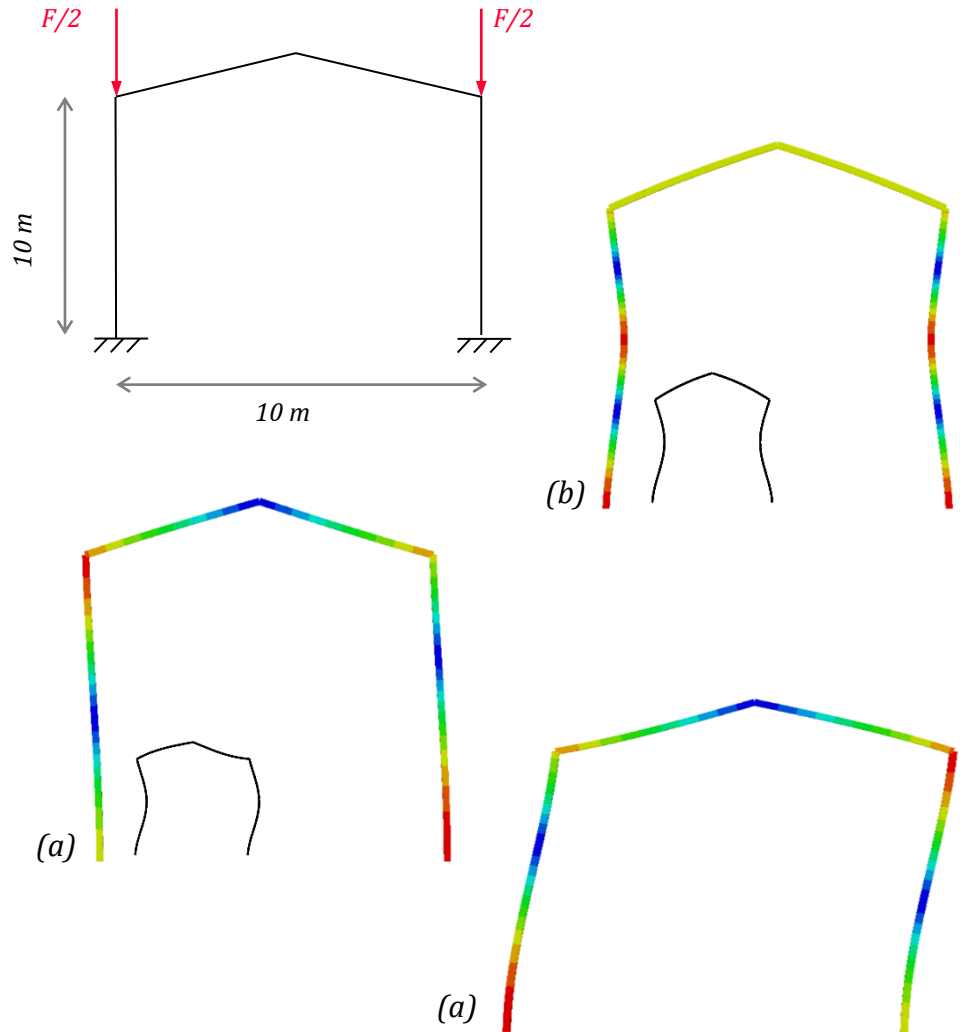


Csavarozott kapcsolat húzásra

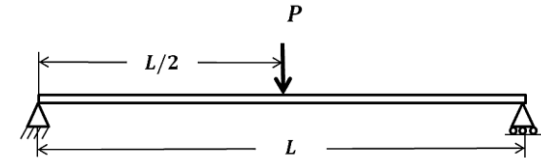


Tervezési példák

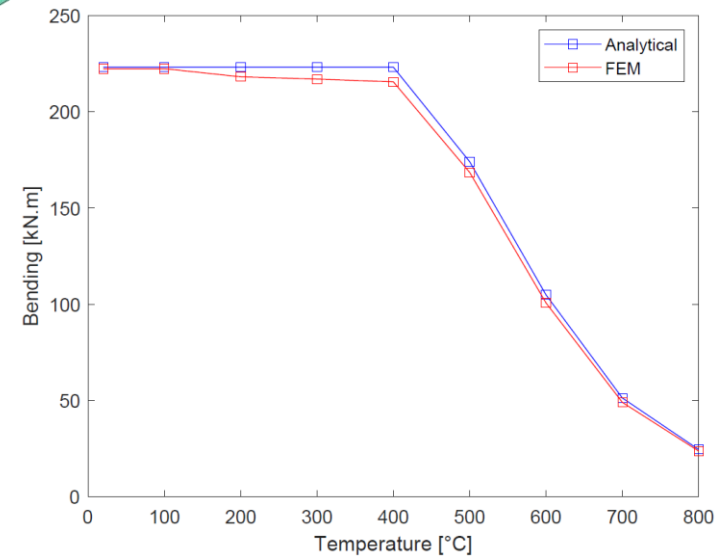
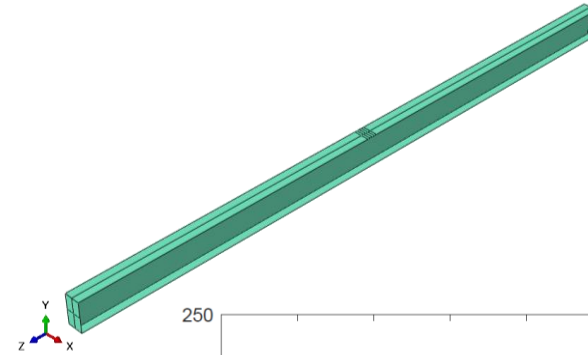
Keret méretezése GMNIA alapokon



Gerenda tűzre való méretezése

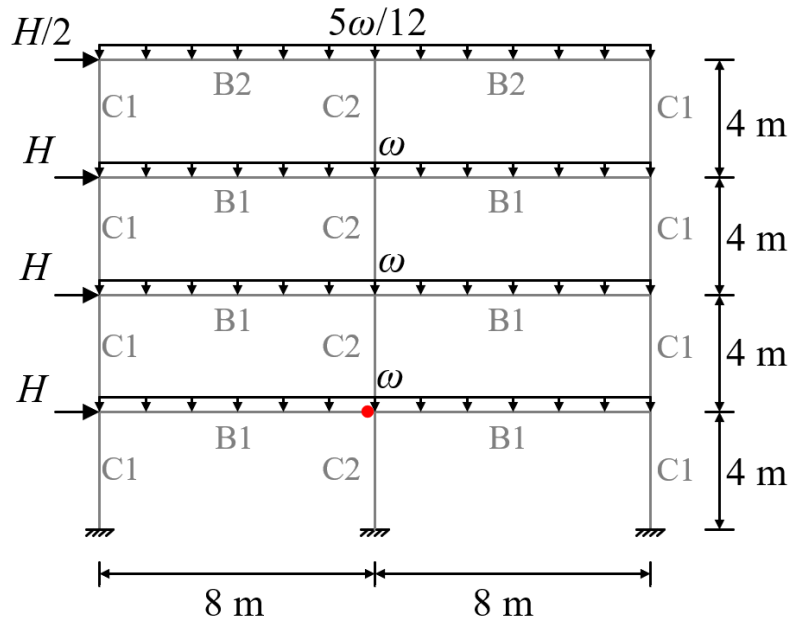


$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} [\gamma_{M0}/\gamma_{Mfi}] M_{Rd}$$



Tervezési példák

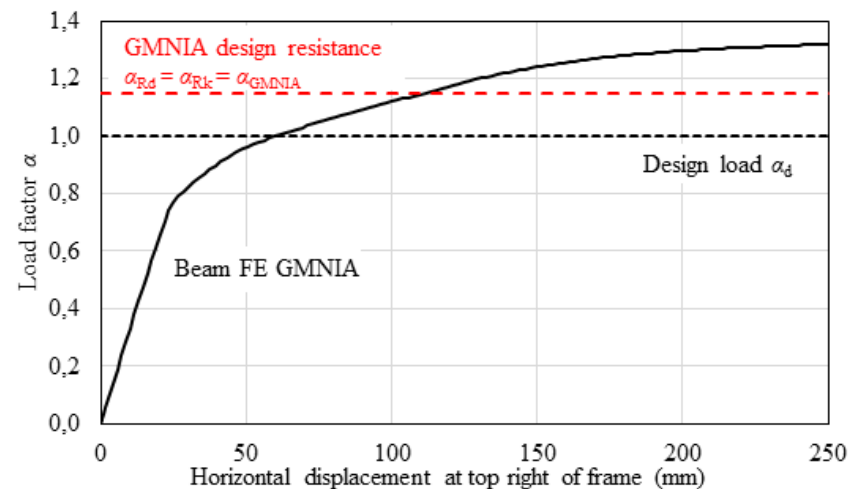
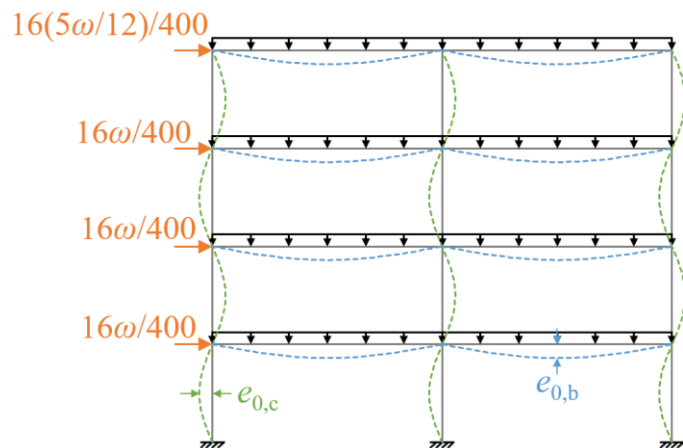
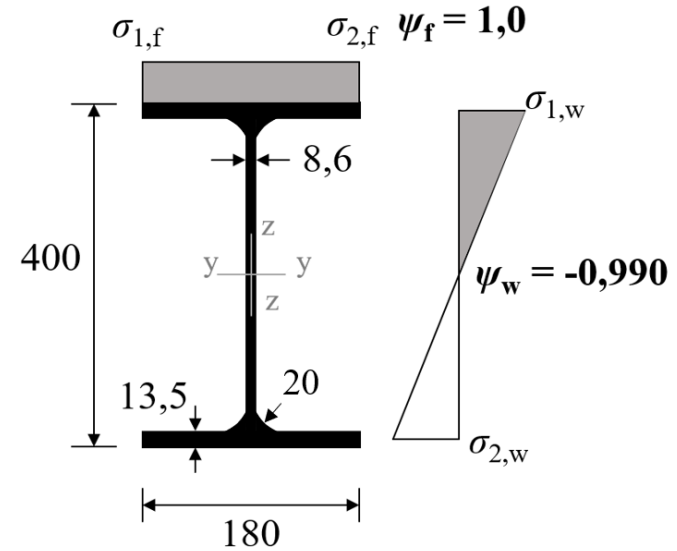
Keret méretezése GMNIA alapokon



$$H = 1,5 \times 20 = 30 \text{ kN}$$

$$\omega = 1,35 \times 20 + 1,5 \times 42 = 90 \text{ kN/m}$$

$C_1 = \text{HEB } 260$
 $C_2 = \text{HEB } 360$
 $B_1 = \text{IPE } 400$
 $B_2 = \text{IPE } 360$





Köszönöm a megtisztelő figyelmet!