

# Szélerőművek tervezésétől a biomechanikai modellekig



Hidak és Szerkezetek Tanszék

Dr. Dunai László  
egyetemi tanár  
tanszékvezető



„Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen”  
(TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002)



# Témák és résztvevők



Hidak belebegésének vizsgálata	Hunyadi Mátyás, Dr. Hegedűs István
Hőhídmentes tetőszerkezeti kialakításban alkalmazott szelemen vizsgálata	Kachichian Mansour, Dr. Dunai László
Vasbeton pörgetett oszlopok szilárdsági vizsgálata	Völgyi István, Dr. Farkas György
Vasalt falazatok méretezése	Fódi Anita
Öszvérfödémek modellezése	Seres Noémi, Dr. Dunai László
Doktori témákhoz kapcsolódó kutatások	Budaházy Viktor, Gidófalvy Kitti, Zsarnóczy Ádám
Hallgatói kutatások	Balogh Tamás, Csikós Attila, Hegyi Péter, Jáger Bence, Kemenczés András, Laczák Lili, Turán Pál, Lengyel Gábor, Sebők Ádám, Somodi Balázs, Wischy Dávid
Oktatási segédanyagok (magyar és idegennyelvű képzés)	Dr. Papp Ferenc, Völgyi István, Czinege Kata, Deák Mihály, Dunai Péter, Heitner Barbara, Leipold Kolos, Rózsás Árpád
Tehetségtámogatás	Dr. Dunai László, Dr. Jakab Gábor, Dr. Kovács Nauzika, Dr. Kovács Tamás, Dr. Vigh L. Gergely



# Témák és résztvevők



Új generációs szélerőművek tartószerkezetének tervezése	Dr. Dunai László, Dr. Vigh László Gergely, Pap Csongor, Sebők Ádám
Acélszerkezeti korrózió hatásának modellezése	Dr. Dunai László, Oszvald Katalin
Környezetbarát anyagok és technológiák infrastruktúra műtárgyak építésénél	Dr. Farkas György, Friedman Noémi, Németh Orsolya
Ízületi protézis beültetés hatása a mozgásra	Dr. Kiss Rita, Dr. Kovács Nauzika, Holnapy Gergely, Magyar O. Mátyás, Pethes Ákos, Szendrői Miklós

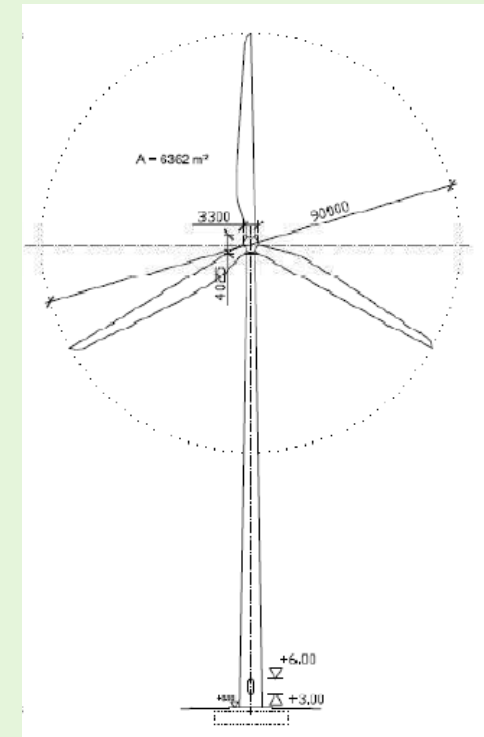
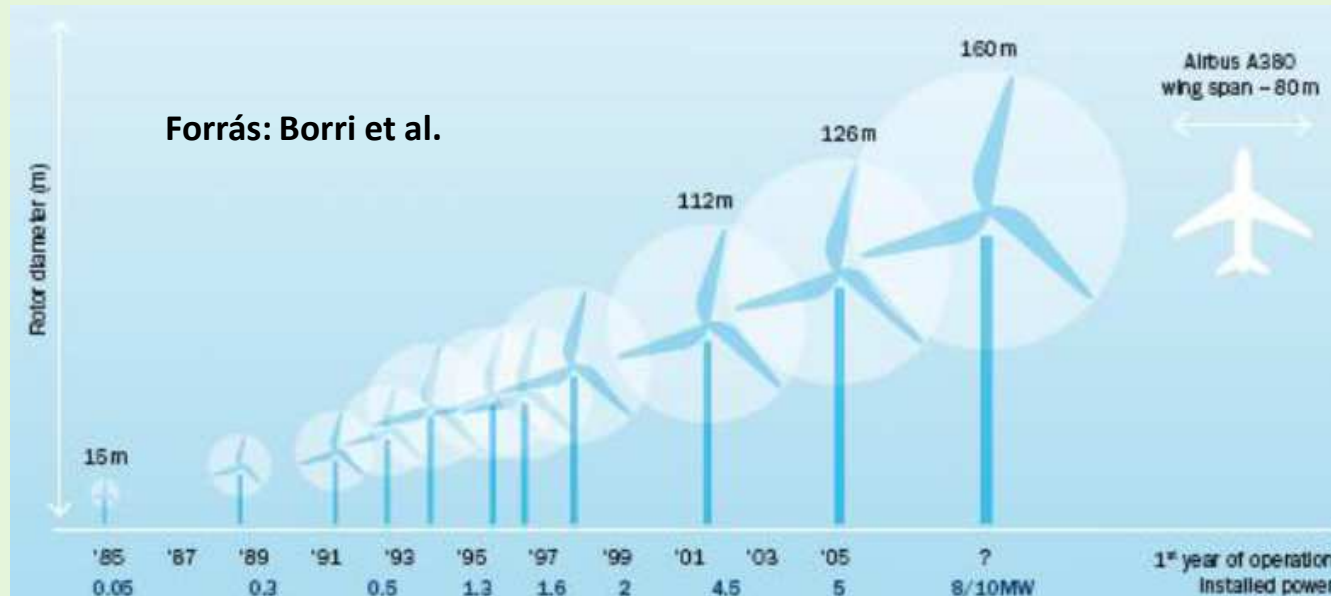


# Témák és résztvevők



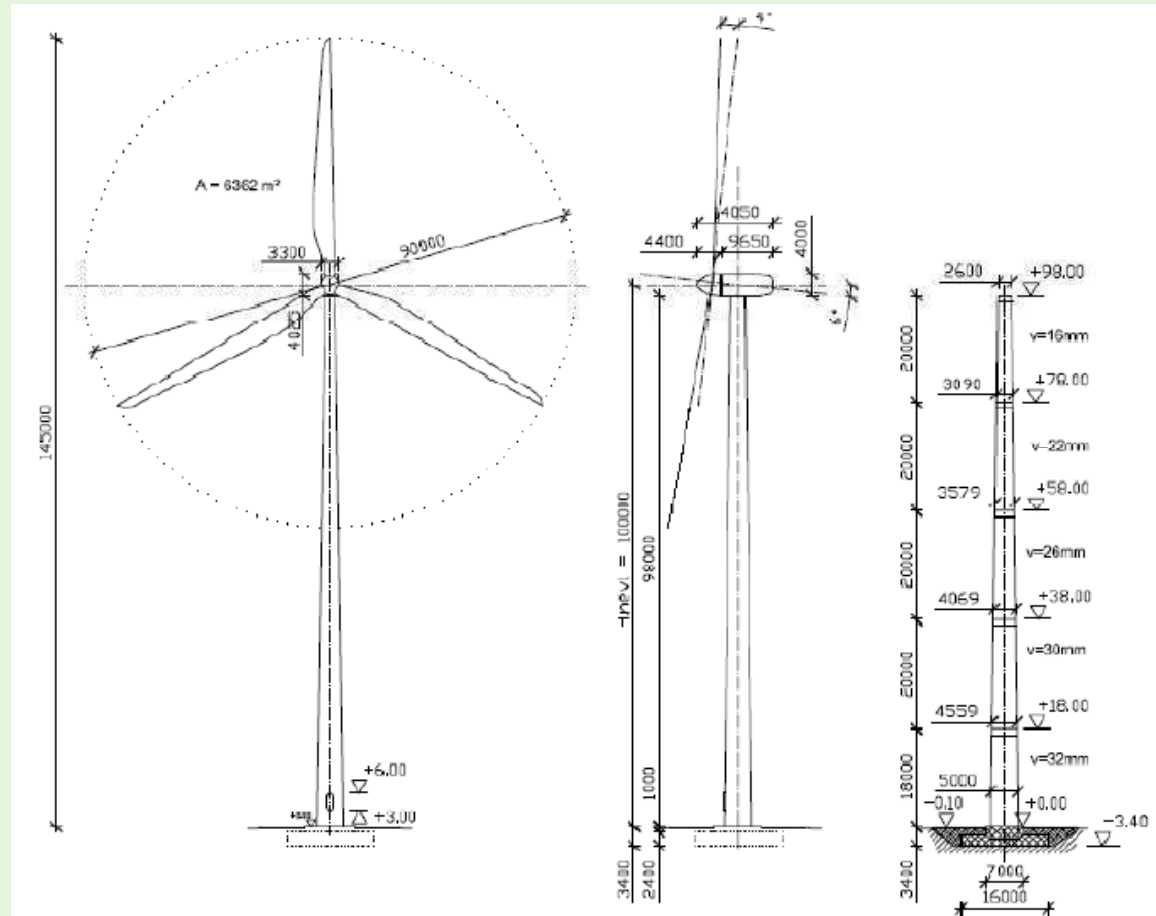
<b>Új generációs szélerőművek tartószerkezetének tervezése</b>	<b>Dr. Dunai László, Dr. Vigh László Gergely, Pap Csongor, Sebők Ádám</b>
Acélszerkezeti korrózió hatásának modellezése	Dr. Dunai László, Oszvald Katalin
Környezetbarát anyagok és technológiák infrastruktúra műtárgyak építésénél	Dr. Farkas György, Friedman Noémi, Németh Orsolya
Ízületi protézis beültetés hatása a mozgásra	Dr. Kiss Rita, Dr. Kovács Nauzika, Holnapy Gergely, Magyar O. Mátyás, Pethes Ákos, Szendrői Miklós





- vékonyfalú csőszelvényű vagy kónikus acél toronyszerkezet
- ↓
- szerkezetoptimalás: globális geometria és karimás kapcsolat

## Eredeti szerkezet



## Változó (optimálandó) paraméterek:

- globális geometria, alak:
  - felső sugár rögzített:  $R = 1,3 \text{ m}$
  - változó kúpfélszög:  $0 \sim 5^\circ$
- változó csőfalvastagság:  $10 \sim 30 \text{ mm}$
- szegmens szám (= merevítőgyűrűk száma):  $3 \sim 7$
- merevítőgyűrűk

## Tervezési kényszerek:

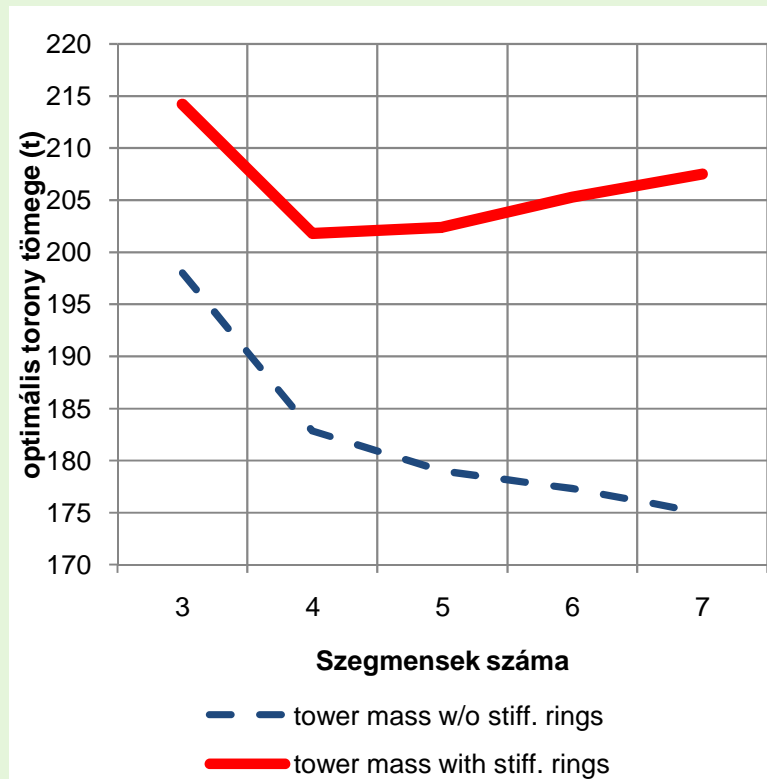
- horpadási szilárdság: alkotó irányú feszültségek domináns hatása
- egyéb tényezők indirekt módon figyelembe véve vagy elhanyagolva → numerikus szimulációval történő validálás

**Optimális** – min. súlyú és egyenletesen kihasznált – **szerkezet**

## A feladat:

- nemlineáris és nem-konvex
- direkt keresési eljárás

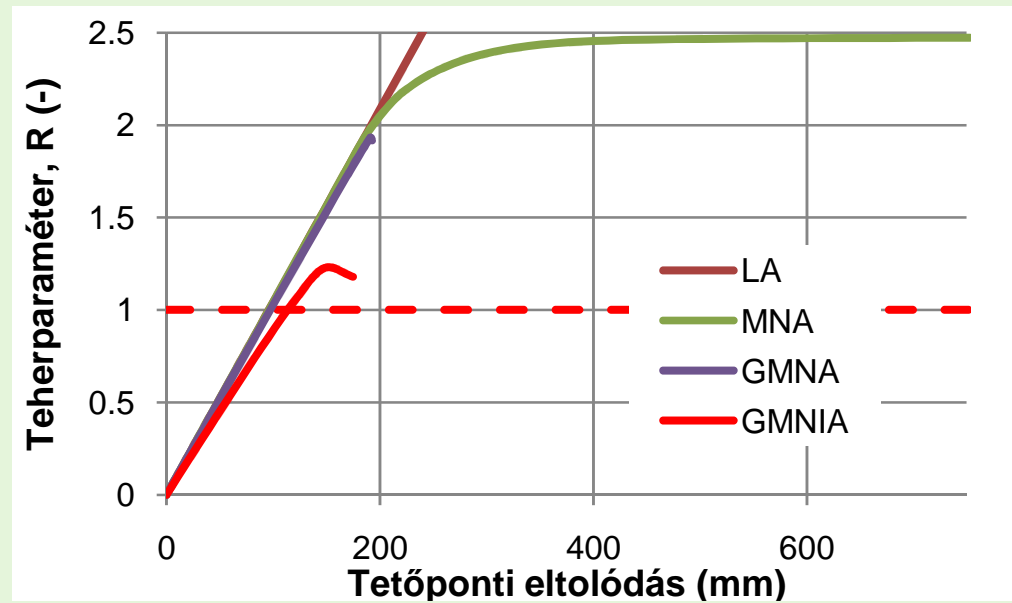
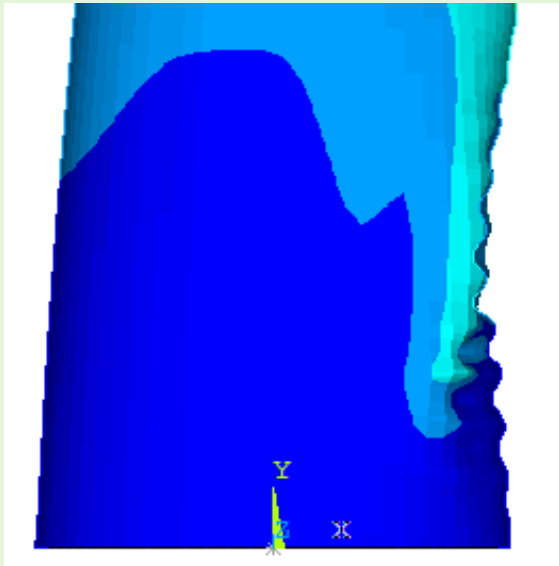
## Globális optimum



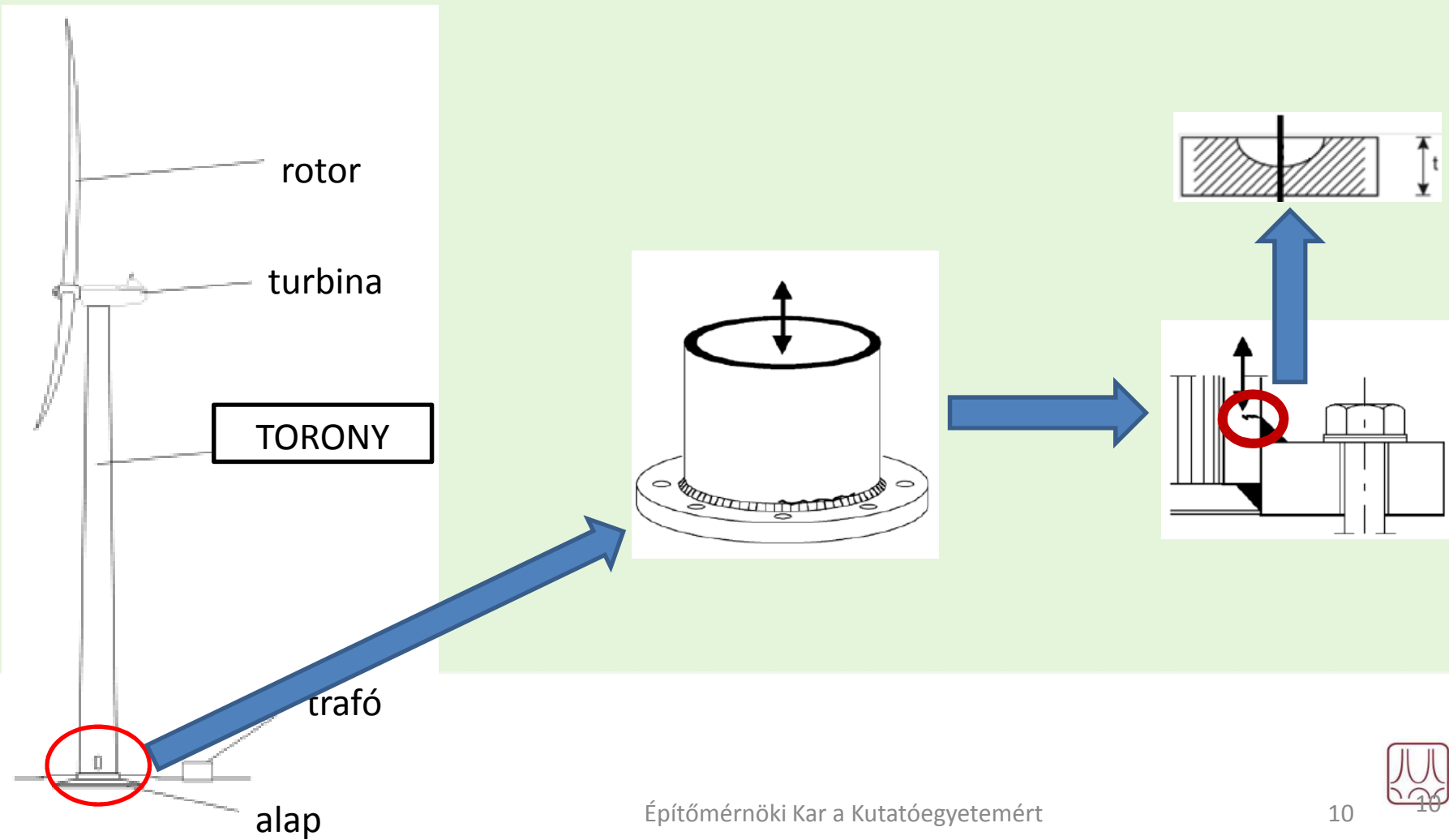
Szegmens #	1.	2.	3.	4.
$h$ [m]	24.50			
$r_1$ [m]	1.30	1.85	2.39	3.08
$t$ [mm]	12	15	16	16
$r_2$ [m]	1.85	2.39	3.08	4.08
$m$ [t]	22.75	38.29	52.73	69.06
$\rho$ [kg/m]	929	1563	2152	2819
$\beta$ [°]	1.29	1.26	1.61	2.34
$\sigma_{x.Rd.1}$ [MPa]	171	172	169	156
$\sigma_{x.Ed.1}$ [MPa]	18	127	154	155
$UF^1$ [%]	10.6	73.6	91.4	99.7
$\sigma_{x.Rd.2}$ [MPa]	159	165	156	130
$\sigma_{x.Ed.2}$ [MPa]	158	164	155	130
$UF^2$ [%]	99.4	99.9	99.7	99.8
<i>W/o stiff.</i> [t]	182.83			
<i>W/ stiff.</i> [t]	<b>201.79</b>			



## Eredmények validálása – nemlineáris VEM analízis alapú méretezés



### Karimás kapcsolat vizsgálata – fáradás és ridegtörés



# Témák és résztvevők



Új generációs szélerőművek tartószerkezetének tervezése	Dr. Dunai László, Dr. Vigh László Gergely, Pap Csongor, Sebők Ádám
<b>Acélszerkezeti korrózió hatásának modellezése</b>	<b>Dr. Dunai László, Oszvald Katalin</b>
Környezetbarát anyagok és technológiák infrastruktúra műtárgyak építésénél	Dr. Farkas György, Friedman Noémi, Németh Orsolya
Ízületi protézis beültetés hatása a mozgásra	Dr. Kiss Rita, Dr. Kovács Nauzika, Holnapy Gergely, Magyar O. Mátyás, Pethes Ákos, Szendrői Miklós



## Jelentős acélszerkezeti korróziós károsodások

- hidak
- távvezetéktartó oszlopok
- csővezetékek

## Okok:

- környezeti hatások
- elégtelen vagy hiányzó karbantartás

## Következmény:

- keresztmetszet és szerkezeti elem gyengülés
- tönkremenetel

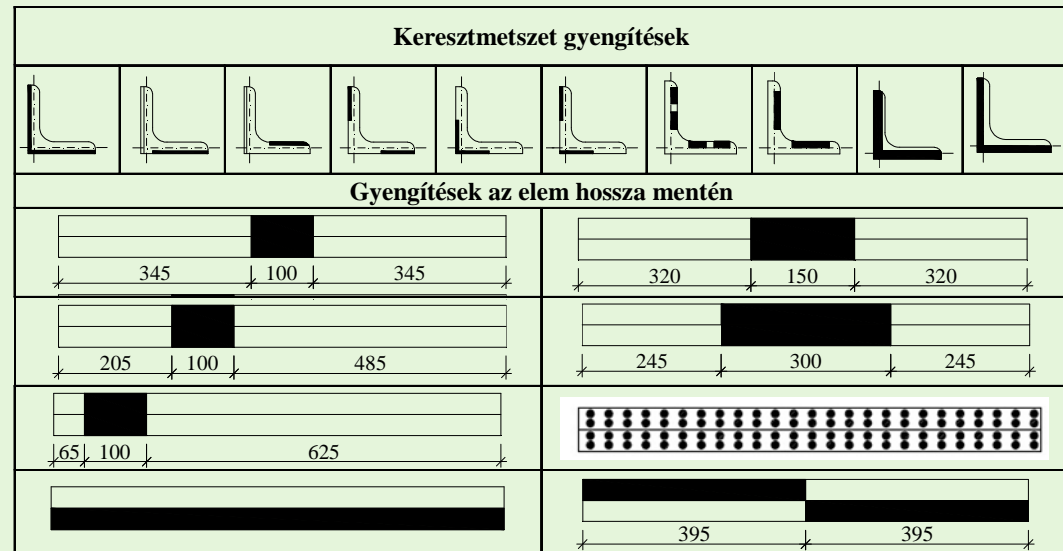
## Célkitűzés:

Méretezési eljárás korrodált szerkezeti elemekre és kapcsolatokra, mely felújítandó szerkezetek vizsgálatánál alkalmazható.



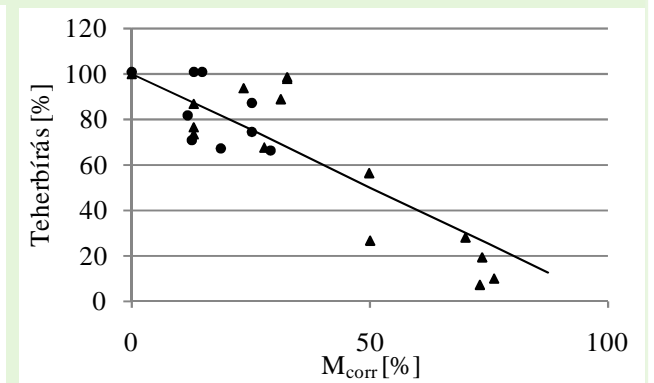
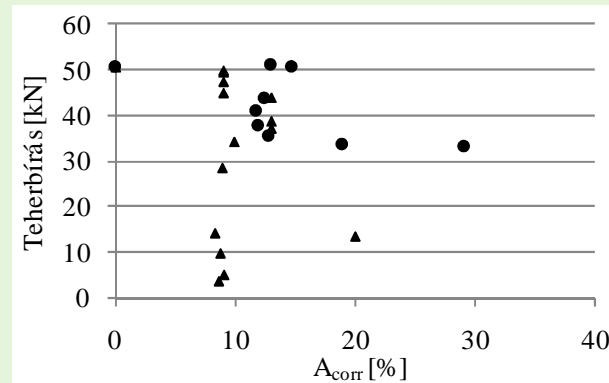
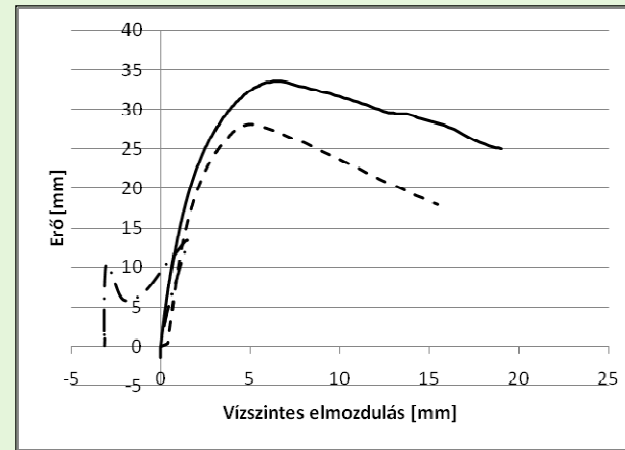
## Kísérleti program

- 24 db szögacél próbatest – központos terhelés
- Korrózió modellezése – vastagság csökkenéssel
- Korrózió típusa
  - egyenletes
  - pontkorrózió
  - lokális



Cél: Különböző nagyságú, elhelyezkedésű és megjelenésű korrózió hatásának vizsgálata.  
A teherbírás és a tönkremeneteli mód meghatározása.

## Kísérleti eredmények



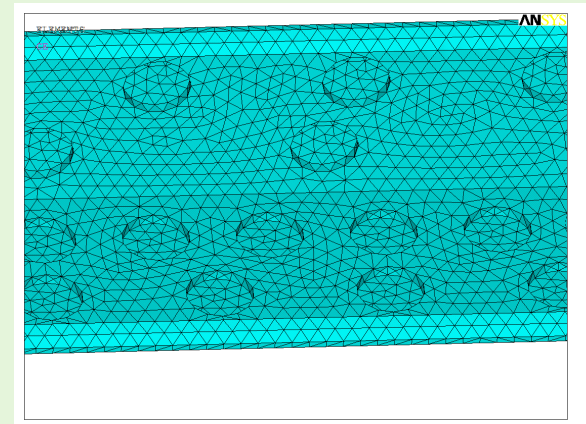
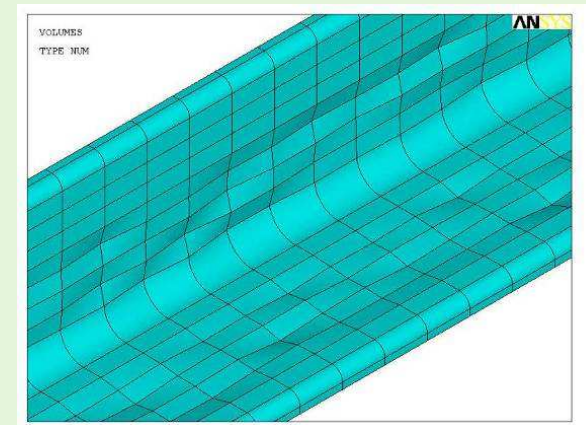
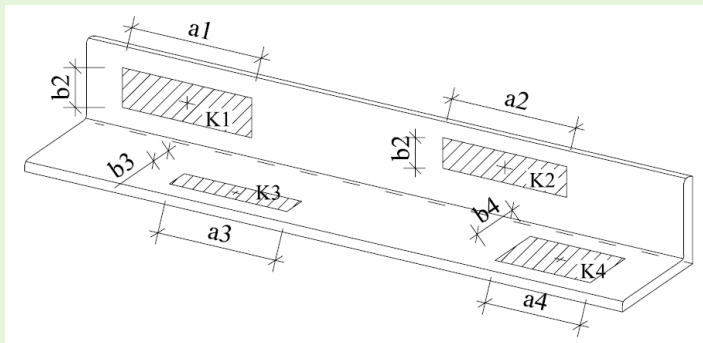
## Numerikus modell

Korrózió modellezése – vastagság csökkenéssel

Különböző megjelenésű korrózió modellezése

- egyenletes korrózió
- eloszlás szerint változó korrózió
- pontkorrózió

Korrózió nagysága, elhelyezkedése és kiterjedése tetszőlegesen megadható

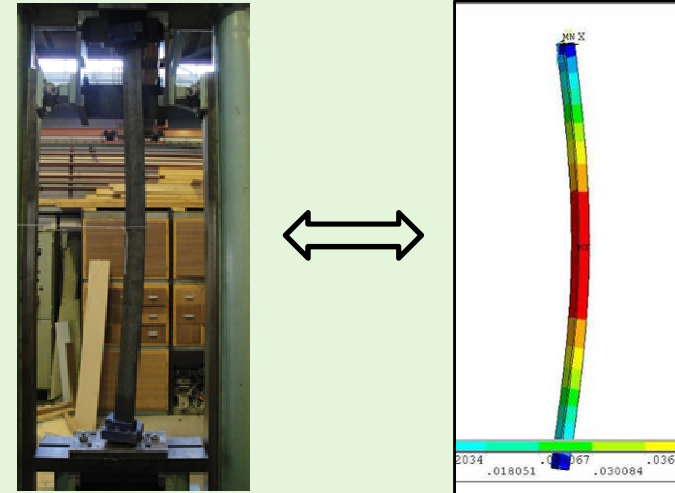


## Numerikus analízis

### Nemlineáris vizsgálatok

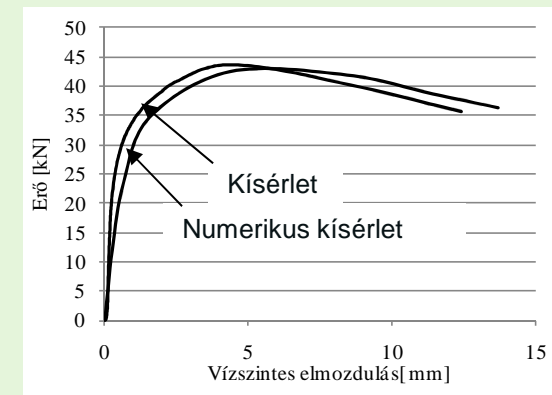
- szimuláció
- virtuális kísérlet

→ Tervezési kihajlási ellenállás



## Modell verifikálás

- virtuális kísérlet – kísérletben használt minden próbatestre
- viselkedés ↔ Erő – elmozdulás diagram egyezés, tönkremeneteli alak

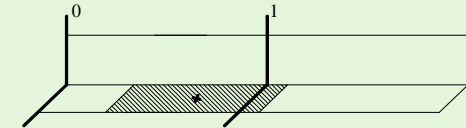
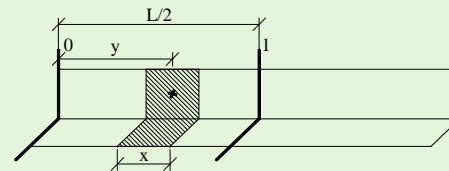




## Virtuális kísérlet sorozat

### Paraméterek együttes hatásának vizsgálata

- elhelyezkedés
- korrózió nagysága
- kiterjedés



## Méretezés

Két paraméterrel:

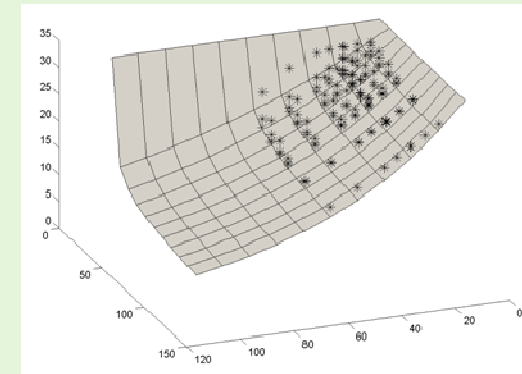
$M_{corr}$  : keresztmetszet-csökkenés

$Ext$  : kiterjedés (elem hossza mentén)

Csökkentő tényező  $\kappa = Ext^{-0.004 \cdot M_{corr}}$

A korrodált szelvény tervezési ellenállása:

$$N_{b,Rd,\kappa} = \kappa \cdot N_{b0,Rd}$$



# Témák és résztvevők



Új generációs szélerőművek tartószerkezetének tervezése	Dr. Dunai László, Dr. Vigh László Gergely, Pap Csongor, Sebők Ádám
Acélszerkezeti korrózió hatásának modellezése	Dr. Dunai László, Oszvald Katalin
<b>Környezetbarát anyagok és technológiák infrastruktúra műtárgyak építésénél</b>	<b>Dr. Farkas György, Friedman Noémi, Németh Orsolya</b>
Ízületi protézis beültetés hatása a mozgásra	Dr. Kiss Rita, Dr. Kovács Nauzika, Holnapy Gergely, Magyar O. Mátyás, Pethes Ákos, Szendrői Miklós



**Témák:**

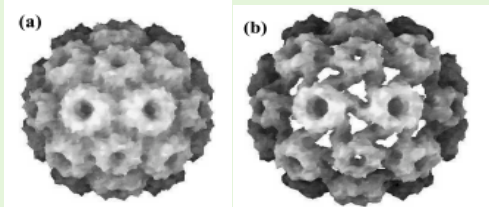
- Nyitható és csukható szerkezetek  
Friedman Noémi – doktorjelölt
- Polimerbetonok alkalmazhatósága és szilárdsági vizsgálatai  
Németh Orsolya – doktorandusz

## Nyitható-csukható szerkezetek

nagy alakváltozásra képesek,  
csukott, kompakt alakzattól egy kiterjedt alakzatra hajthatók, stabilak és teherbírók.

A természetben:

vírus kapszidok  
levelek  
rovarszárnyak



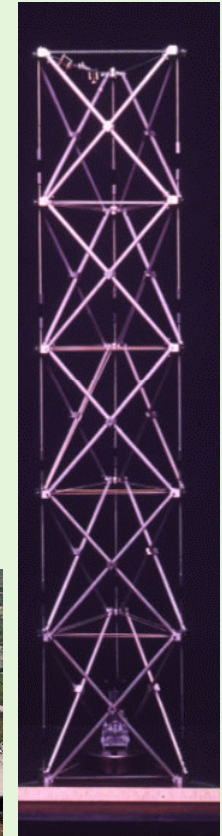
Ember által készített:

Kisebb lépték: szék, esernyő, kerítés

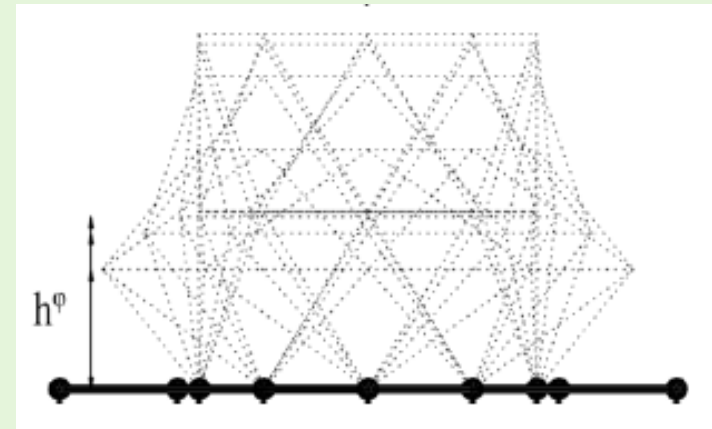
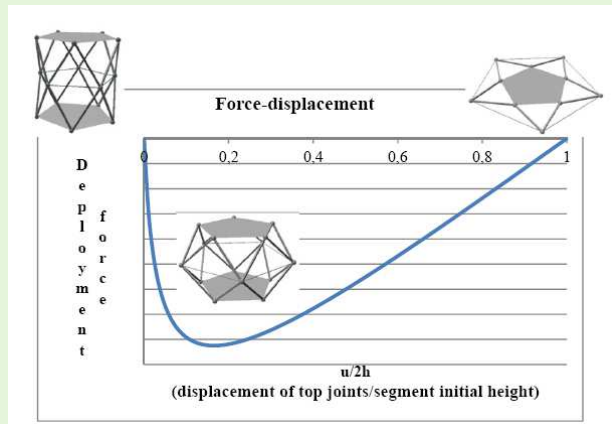
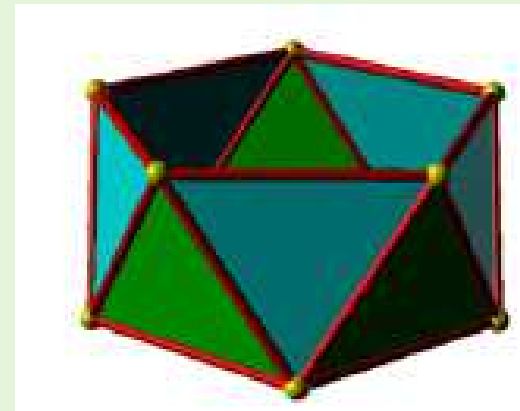
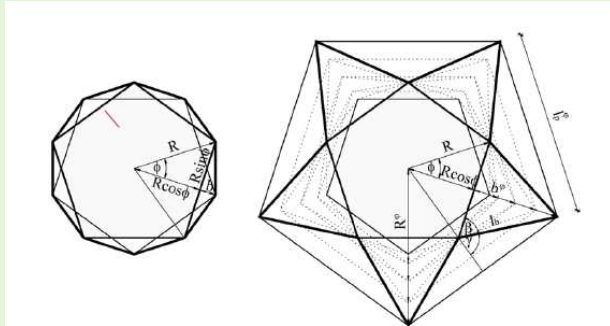
Úrkutatás: torony, napelemtábla, reflektorantenna

Orvosi segédeszköz: sztent, csípőprotézis

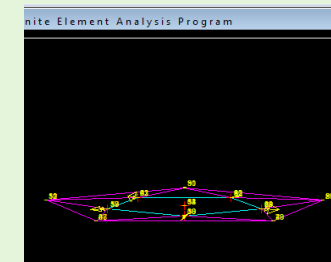
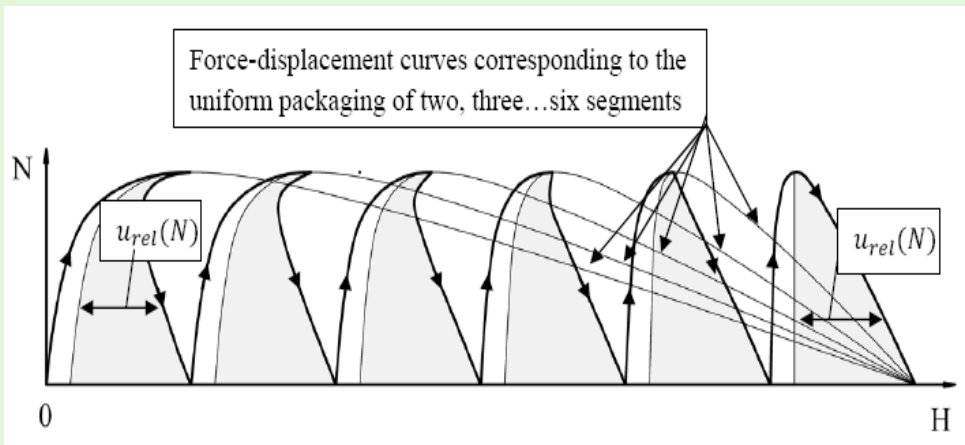
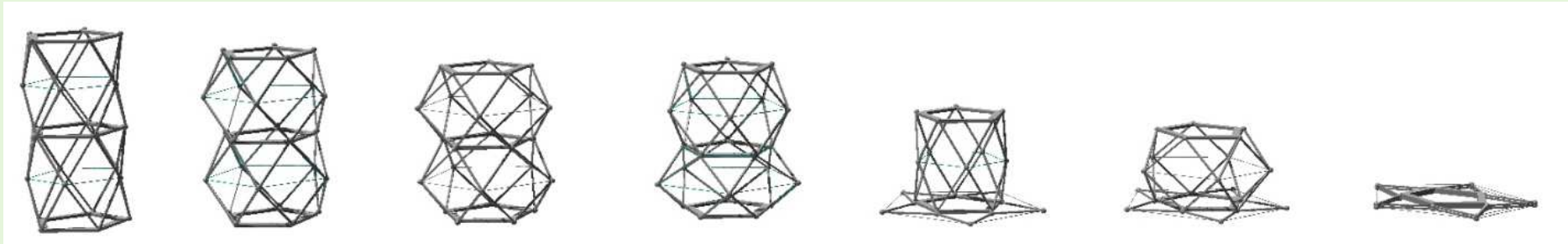
Építészeti és mérnöki szerkezetek: sátrak, hordozható  
menedékek, szétnyitható tetőszerkezetek, kinetikus  
kiállítási kijelzők.



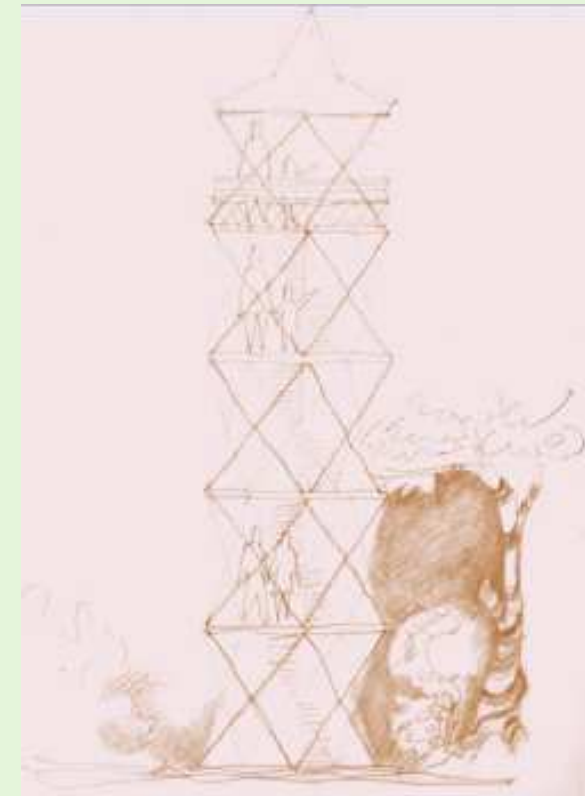
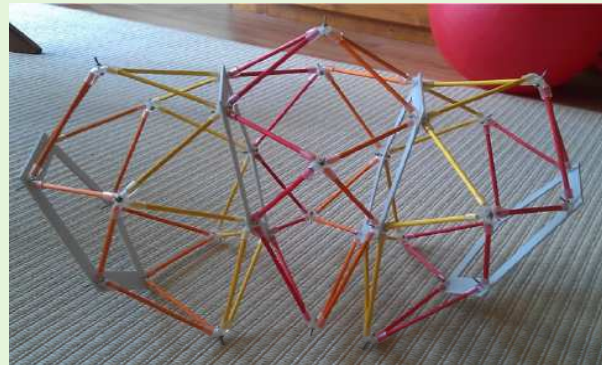
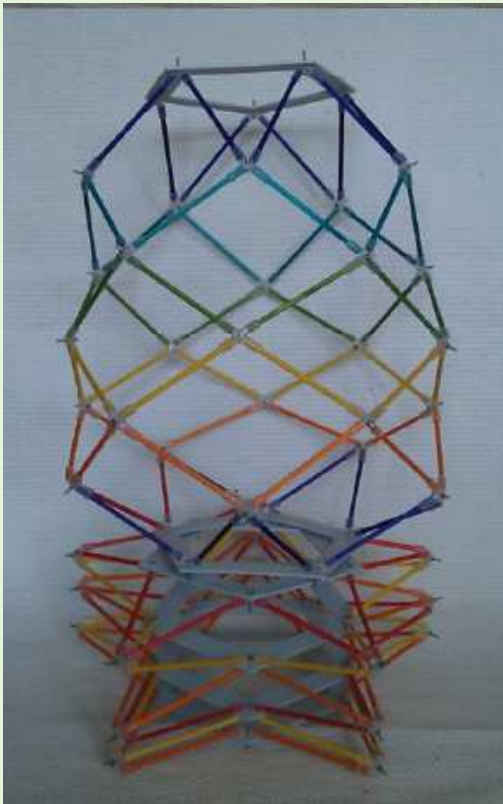
## Alapszegmens analitikus vizsgálata



## Komplex szerkezet analitikus és numerikus vizsgálata



## Fizikai modellek, alkalmazási lehetőségek



## Polimerbeton

Használati körülmények között  
kőszerűen szilárd,  
tiszta polimer kötőanyagú,  
szilárd adalékanyagot, esetleg módosító, illetve  
segédanyagot tartalmazó,  
friss állapotban formázható anyagrendszer.



	Szilárdság átlagértéke (N/mm <sup>2</sup> )	Szórás (N/mm <sup>2</sup> )	Szórás (%)
Központos húzószilárdság (1)	17,67	0,31	1,75
Hajlító-húzó szilárdság (2)	24,89	2,94	11,81
Nyomószilárdság (3)	98,70	3,12	3,16



## Lehorgonyzási hossz vizsgálata



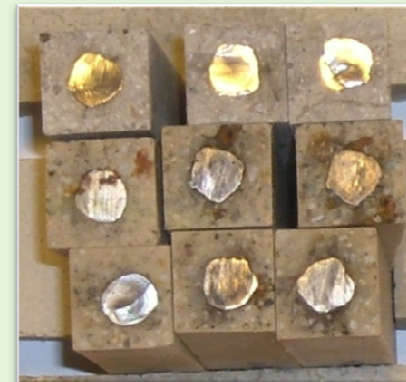
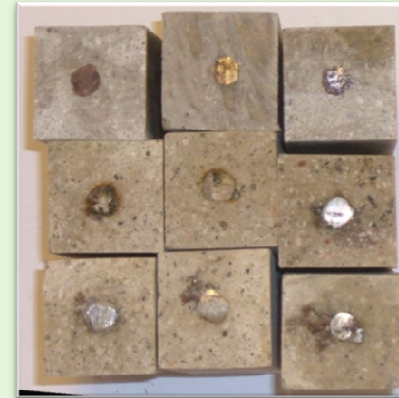
## A polimerbeton korrózióállósága

6 hónapos vizsgálati időtartam

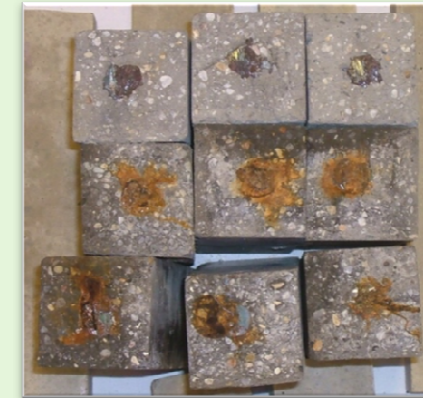
1:5 arányú só-víz oldal korróziós  
hatásának kitéve



Polimerbeton



Cementbeton



## PET adalékkal módosított polimerbeton



		Szilárdság átlagértéke (N/mm <sup>2</sup> )	Szórás (N/mm <sup>2</sup> )	Szórás (%)
Hajlító-húzó szilárdság	kontroll	24,89	2,94	11,81
	PET szál	26,44	2,92	11,04
	PET pehely	24,65	2,22	9,00
Nyomószilárdság	kontroll	98,70	3,12	3,16
	PET szál	98,28	5,79	5,89
	PET pehely	81,20	9,41	11,59

# Témák és résztvevők



Új generációs szélerőművek tartószerkezetének tervezése	Dr. Dunai László, Dr. Vigh László Gergely, Pap Csongor, Sebők Ádám
Acélszerkezeti korrózió hatásának modellezése	Dr. Dunai László, Oszvald Katalin
Környezetbarát anyagok és technológiák infrastruktúra műtárgyak építésénél	Dr. Farkas György, Friedman Noémi, Németh Orsolya
<b>Ízületi protézis beültetés hatása a mozgásra</b>	<b>Dr. Kiss Rita, Dr. Kovács Nauzika, Holnapy Gergely, Magyar O. Mátyás, Pethes Ákos, Szendrői Miklós</b>



## Témák:

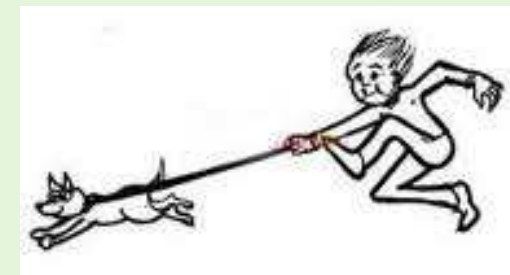
- A hirtelen irányváltatás utáni egyensúlyozó képesség modellezése (Dr. Kiss Rita)
- A hirtelen irányváltatás utáni egyensúlyozó képesség - befolyásoló tényezők (Dr. Kiss Rita)
- A meniscus szakadás hatása a járásváltozékonyságra és a hirtelen irányváltatás utáni egyensúlyozó képességre (Dr. Kiss Rita, Magyar O. Mátyás)
- A térdízületi és a csípőízületi protézis hatása a járásváltozékonyságra és a hirtelen irányváltatás utáni egyensúlyozó képességre (Dr. Kiss Rita, Holnapy Gergely, Dr. Kovács Nauzika, Pethes Ákos)

## Témák:

- **A hirtelen irányváltogatás utáni egyensúlyozó képesség modellezése (Dr. Kiss Rita)**
- **A hirtelen irányváltogatás utáni egyensúlyozó képesség - befolyásoló tényezők (Dr. Kiss Rita)**
- A meniscus szakadás hatása a járásváltozékonyságra és a hirtelen irányváltogatás utáni egyensúlyozó képességre (Dr. Kiss Rita, Magyar O. Mátyás)
- A térdízületi és a csípőízületi protézis hatása a járásváltozékonyságra és a hirtelen irányváltogatás utáni egyensúlyozó képességre (Dr. Kiss Rita, Holnapy Gergely, Dr. Kovács Nauzika, Pethes Ákos)

## Dinamikus egyensúlyozó képesség

- mozgás közben az egyensúly visszanyerése, fenntartása
  - járás, futás
  - különböző sportmozgások (labdajátékok, harcművészet)
- hirtelen erőhatások után az egyensúly visszanyerése
  - lökések
  - autóbusz fékezése
  - kutyasétáltatás közben a kutya rántása

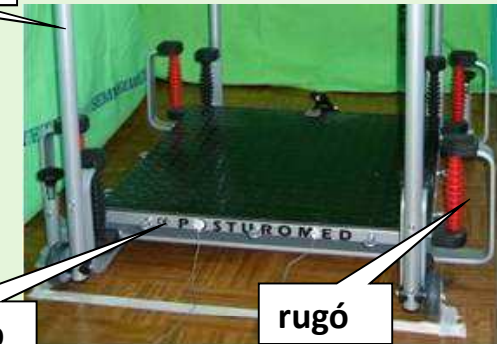


## Modellezési lehetőség

### PosturoMed

- kereskedelmi forgalomban kapható, sportban és a neurológiai rehabilitációban ismert;
- 8 rugóval merev keretre felfüggesztett merev lap, amely a vízszintes síkban szabadon tud mozogni;
- a középhelyzetéből 20 mm-re kimozdított merev lap a rögzítő elemmel itt rögzíthető;
- feloldás után a lap mozgásba hozható.

merev keret



merev lap

rugó

rögzítő/  
feloldó elem





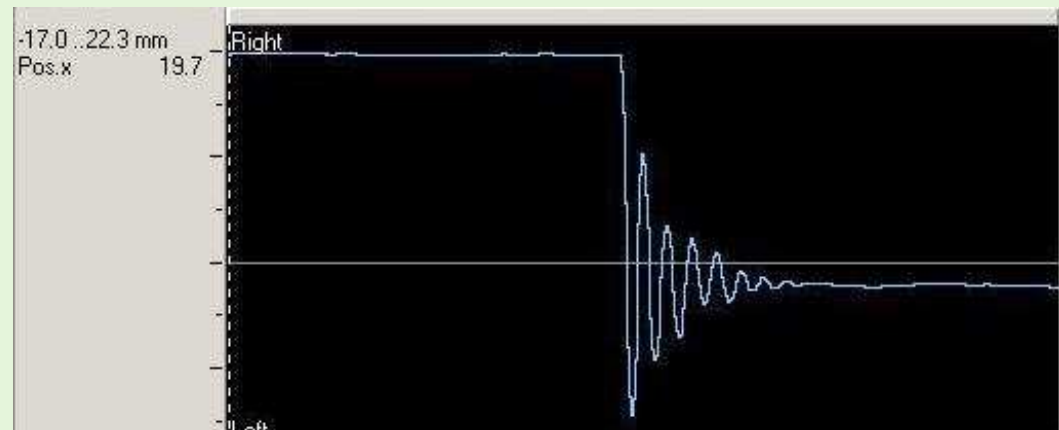
## Mérés állás közben

Három külön mérés, melyek során a vizsgált személy először mindkét lábán, majd a jobb, és ezt követően a bal lábán áll, amikor a rugók kiengedésével a merev lapot mozgásba hozzuk.



## Mért paraméter

Az egyedi érzékelős, ultrahang-alapú mozgásvizsgáló rendszerrel a lap mozgását rögzítjük.



## Modell

A lengő lap vizsgált személlyel együtt csillapított lengőmozgást végez.

### Számítható jellemzők

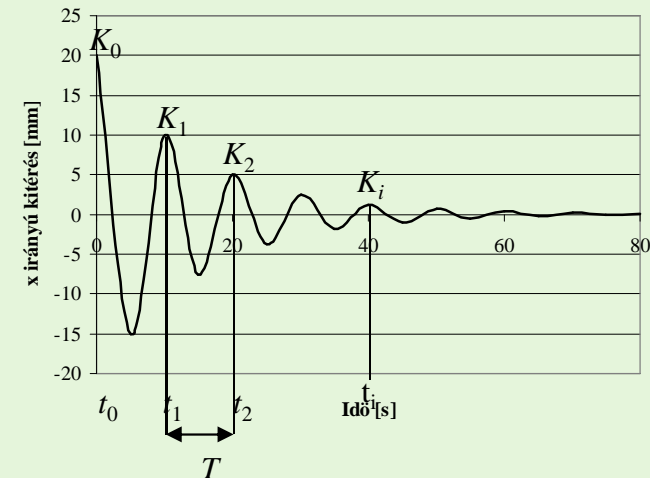
logaritmikus dekrementum:  $\Lambda_i = \frac{1}{i-1} \ln \frac{K_1}{K_i}$

lengésidő:  $T = \frac{1}{i-1} (t_i - t_1)$

frekvencia:  $f = \nu = \frac{1}{T}$

Lehr-féle csillapítási arány:  $D = \frac{\Lambda}{\sqrt{\Lambda^2 + 4\pi^2}}$

sajátfrekvencia:  $f_0 = \nu_0 = \frac{1}{T\sqrt{1-D^2}}$

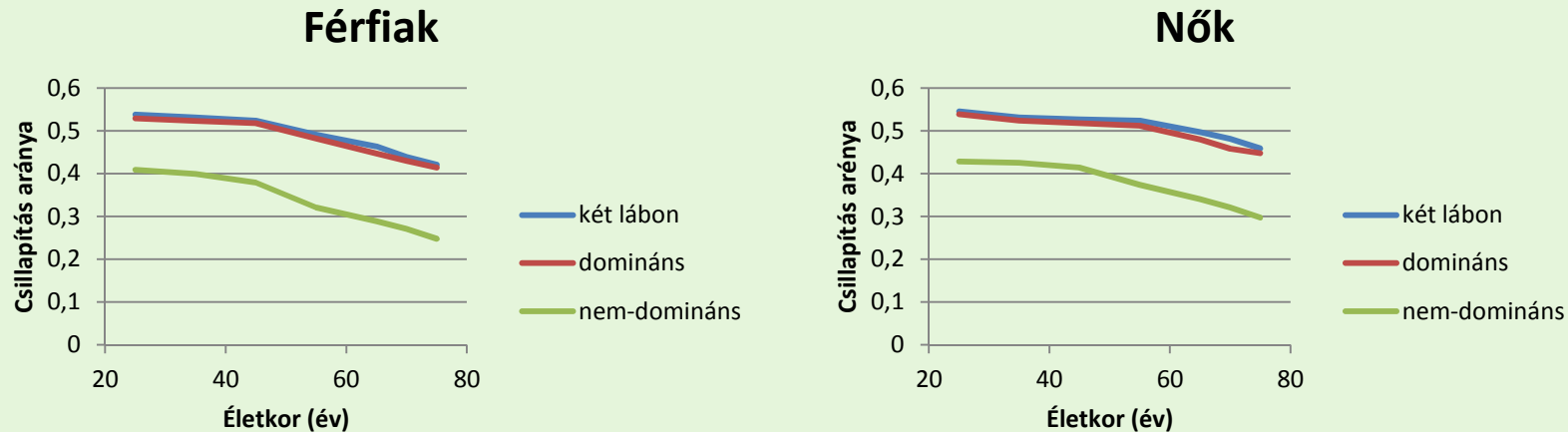


## Befolyásoló tényezők

- oldal dominancia
- életkor
- vizsgált személy neme
- testtömeg, testmagasság, testtömeg index (BMI)

## Vizsgált személyek

Összesen 474 egészséges személyt vizsgáltunk, a fenti tényezők alapján csoportokban bontva.



**Dominancia:** a nem-domináns láb egyensúlyozó képessége szignifikánsan kisebb, a domináns láb egyensúlyozó képessége.

**Életkor:** az életkor előrehaladtával az egyensúlyozás romlik, a romlás mértéke idős korban jelentősebb, elsősorban a vesztibuláris és a szomatoszenzoros működés romlása miatt.

**Nem:** A nők egyensúlyozó képessége jobb, az antropometriai arányok, a flexibilisebb ízületek miatt.

Köszönöm a figyelmet!