

# Vályogfalak teherbírásának kísérleti és elméleti vizsgálata

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszékén a Ph. D. fokozat részleges teljesítéséeként benyújtott tézisfüzet

Orbánné Csicsely Ágnes

Témavezetők:  
Józsa Zsuzsanna, PhD  
Sajtos István, PhD

Budapest  
2006

## 1. BEVEZETÉS

A KSH adatai szerint hazánkban az épületek több mint 25 %-a még ma is föld- vagy vályogfalú. A szakszerűtlenül megépített, illetve nem megfelelően karbantartott házak kapcsán elterjedt az a nézet, hogy ez az építési mód elavult, és nem felel meg a XXI. század követelményeinek.

Mára azonban már kiderült, hogy a föld- és vályogépítésnek nem csak hátránya, hanem rengeteg előnye is van. Elterjedőben van, ha lassan is, egy új építési irányvonal, mely a természetes anyagokból való építést tűzte ki célul. Ez az ökológikus vagy környezetkímélő szemléletmód a vályog korszerű alkalmazását igyekszik terjeszteni és megismertetni az ebben az anyagban rejlő lehetőségeket.

Az emberek számára az éremnek ez az oldala nem, vagy csak homályosan ismert, így a vályoggal szemben felhozott vádakot tekintük az építőanyag jellemzőjének. A vályogfal építése régen apáról - fiúra szállt, ekkor a jól bevált technológiát mindenki ismerte. Ez ma már sajnos nem így van, de egy kis odafigyeléssel ez az építésmód ma is könnyen megtanulható, megtanítható, így olcsón, kis „energia ráfordítással” lehet házilagosan építkezni.

A téma aktualitása napjainkban nő, hiszen a vályog alkalmazása az önrés építkezésekben is megjelent, ami annak tulajdonítható, hogy az alapanyag olcsó, helyben megtalálható, az építés technológiája könnyen elsajátítható, ugyanakkor a kész ház egészséges környezetet biztosít a benne élők számára. Elterjedését segíti az is, hogy többféle korszerű üzemi gyártástechnológia található ma Magyarországon. Sajnos az ár- és a belvizes területeken a vályogépületek összedőléséről szólnak a híradások. Ugyanakkor, ahol a víz nem tudja károsítani a falakat, szép példákat lehet találni a régi vályogfalas parasztházak korszerűsítéséről, a mai, modern körülményeket biztosító átalakításáról, illetve új házak építéséről.

## 2. AZ ÉRTEKEZÉS CÉLJA, PROBLÉMA FELVETÉS

A vályog falazóelemek, falazatok és falak erőtani vizsgálatára és méretezésére nincs érvényes szabvány, vagy szabályozás. A Moderner Lehm-bau-ban (Steingass, 2002) között mérési eljárás lineárisan rugalmas anyagmodell alapján adja meg a vályogfalak teherbírását. A vályogfalak viselkedésének leírására azonban ez a modell csak korlátozottan alkalmas, ezért fontos, hogy az anyagtulajdonságokat jobban követő méretezési módszer álljon rendelkezésre a falak vizsgálatára.

Az értekezés első részének célja az eltérő összetételű vályog falazóelemek anyagtani tulajdonságainak megismerése a tulajdonságmódosító adalékok (szalma, nád, fűreszpor) függvényében.<sup>1</sup>

A vályog falak tervezése és építése szempontjából fontos kérdések:

- a vályog falazóelemek<sup>2</sup> összetétele hogyan befolyásolja a falazóelemek száradási zsugorodását; a falazóelemek és a belőlük épített falelemek<sup>3</sup>, nyomószilárdságát és alakváltozási képességét,
- milyen anyagmodelllel írható le a vályog falelemek viselkedése nyomásra.

<sup>1</sup> Az egyszerűség kedvéért a továbbiakban a szalmával kevert vályog elemeket *szalma vályognak*, a náddal kevertet *nád vályognak* nevezem.

<sup>2</sup> a falazat/falelem anyaga (1. táblázat)

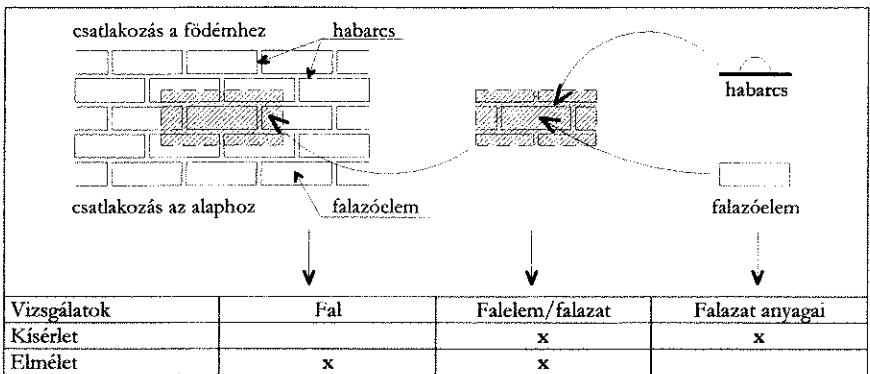
<sup>3</sup> a nyomási kísérletek során alkalmazott legkisebb faldarab, amely azonos viselkedést mutat függetlenül attól, hogy a falazóelemek kötési módnak megfelelő elrendezése milyen a falelemen belül.

Az értekezés második részének célja a kísérletek alapján meghatározott anyagmodell szerint viselkedő vályog falelem és fal<sup>4</sup> elméleti teherbírásának elméleti vizsgálata.

Fontos és megválaszolandó kérdések, hogy:

- az alakváltozásra fellágyuló anyagmodell alakváltozásra fellágyuló ága milyen módon befolyásolja keresztmetszet teherbírását, milyen jellemző tulajdonságai vannak a keresztmetszet teherbírási vonalának,
- hogyan végezhető el külpontos nyomásra, másodrendű elmélet szerint a vályogfal teherbírásának vizsgálata az alakváltozásra fellágyuló anyagmodell figyelembevételével,
- milyen gyakorlati méretezési módszer adható a vályogfalak tervezésére.

Az értekezés kapcsán elvégzett kísérleti és elméleti vizsgálatokat az 1. táblázat foglalja össze.



1. táblázat: Vizsgálatok összefoglalása

### 3. AZ ÉRTEKEZÉS ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEI<sup>5</sup>

#### 3.1 A vályog anyagtani tulajdonságainak vizsgálata

A vályog falazóelemekre, falazatokra és falakra vonatkozó érvényes magyar szabvány, vagy szabályozás hiányában a kísérletek összeállításánál a más falazati anyagokra (falazóelemekre és falazatokra) vonatkozó szabványokat tekintettem kiindulási alpnak, de figyelembe vettem a vályog anyag kísérletet várhatóan befolyásoló sajátosságait. A modern vályog falazóelemek hőszigetelő képességének növelése érdekében nagy mennyiségű szerves anyagot (tulajdonságmódosító adalékot) kevernek az agyaghoz. Laboratóriumban vizsgáltam a tulajdonságmódosító adalékok hatását a falazóelem száradási zsugorodására, a falazóelem és falelem nyomószilárdságára és alakváltozási képességére.

A vizsgálatokban szereplő minták méretét az elemek gyártási technológiája határozta meg.

Kutatásaim során három kísérlet sorozatot végeztem:

- 1. kísérlet sorozat: nyolc eltérő összetételű kisüzemi vályog falazóelem<sup>6</sup> száradási zsugorodásának és nyomószilárdságának mérése.

<sup>4</sup> A fal vagy falazati szerkezetet más szerkezeti elemekkel (például alappal, földemmel) összeépített falazott épület részt jeleni.

<sup>5</sup> A vastagon szedett szövegrészek ismertetik az új tudományos megállapításokat, a normál szövegrészek azok bevezetését és értelmezését adják.

<sup>6</sup> A Naturbau Kft. magyarországi telephelyén földnedves keverékből géppel préselt vályog falazóelem

Ezek a vizsgálatok előkísérletnek tekinthetők abban az értelemben, hogy az itt kapott eredmények alapján választottam ki a 2. kísérletsorozatban szereplő vályog falazóelemek típusát.

- 2. *kísérletsorozat*: öt eltérő összetételű kisüzemi vályog falazóelem, és azokból épült falelemek nyomószilárdsági vizsgálata.
- 3. *kísérletsorozat*: téglagyári vályog falazóelemek<sup>7</sup> és abból épült falelemek vizsgálata az alakváltozásra fellágyuló anyagmodell eső ágának kimérése.

Minta jele	A keverék összetevői térfogatarányban				Kísérleti próbatest
	Agyag	Szalma	Nád	Fűrészpor	
SZ <sub>1</sub>	3	1	-	-	falazó- és falelem
N <sub>1</sub>	3	-	1	-	falazó- és falelem
SZ <sub>2</sub>	3	2	-	-	falazóelem
N <sub>2</sub>	3	-	2	-	falazóelem
SZ <sub>1</sub> F <sub>1</sub>	3	1	-	1	falazóelem
N <sub>1</sub> F <sub>1</sub>	3	-	1	1	falazóelem
SZ <sub>1</sub> F <sub>1/2</sub>	3	1	-	1/2	falazó- és falelem
N <sub>1</sub> F <sub>1/2</sub>	3	-	1	1/2	falazó- és falelem
R (referencia)	3	-	-	-	falelem

2. táblázat: A kísérlethez készített vályog elemek összetétele térfogatarányban

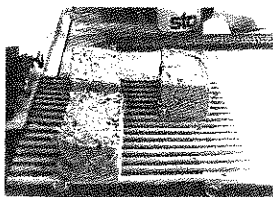
A kísérleteket a Budapesti Műszaki Egyetem Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék és az Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék laboratóriumában végeztem.

### 3.1.1 Száradási zsugorodási vizsgálatok

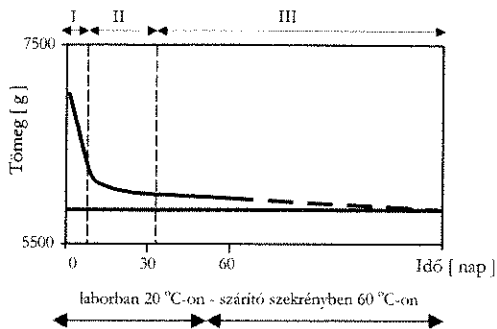
A száradási zsugorodási kísérletek során a kísérletek kezdetéig nedvesen tartott (főliából csomagolt) elemeket három helyen (két szélességi és egy hosszúsági irányban) jelöltem meg (1. ábra). Az egyes mérések alkalmával tolmérővel a méretváltozást, METRIPOND bolti mérleggel a tömegváltozást mértem 0,01 milliméter illetve 10 gramm pontossággal. A minták 9 illetve 11 hétig a laboratóriumban száradtak, cca. 20°C-on. Amikor az elemeken laboratóriumi körülmények között már nem észleltem méretváltozást, akkor a mintákat szárítószekrénybe helyeztem, és 60°C-on tömegállandóságig szárítottam azokat. Az így kapott eredményeket grafikonon ábrázoltam, példaként: a 2. ábra az SZ<sub>1</sub> jelű falazóelem tömegváltozását mutatja az idő függvényében. (Ez a próbatest 3 térfogatrész agyag, 1 rész nedves szalma összetétellel készült.) Az ábrán jól látszik az anyag száradásának három fázisa. Az első szakaszban a nedvességtartalom változása lineáris, itt a felszín közeli felületek száradnak, ahonnan a nedvesség gyorsan tud távozni. Ez a száradási szakasz a kapilláris telítettségnek megfelelő nedvességtartalom 40-60 %-áig tart. A száradás második szakaszának sebessége a kapilláris nedvességtranszporttól függ, ilyenkor a téglá belsejéből távozik a szabad víz; a harmadik szakaszt a páradiffúzió határozza meg.

A kísérletek általános tapasztalata, hogy a nád vályog falazóelemek hamarabb száradtak ki, mint a szalma vályog elemek, és a száradási zsugorodás értékeik is kisebbek.

<sup>7</sup> Fehérvári Téglaiipari Kft. székesfehérvári üzemében égetett kerámia téglák gyártástechnológiája szerint készültek azzal a különbséggel, külön e célra választották ki a megfelelő agyagot és kis mennyiségű (5-10 tömeg%) fűrészport keverték bele.



1. ábra: Falazóelemek száradása a laboratóriumban.



2. ábra: Az SZ<sub>1</sub> jelű minta tömegének változása az idő függvényében.

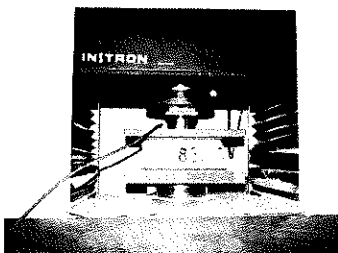
### 1/a. tézis:

Laboratóriumi mérésekkel igazoltam, hogy a falazóelemek kezdeti víztartalmát és kiszáradási idejét minden esetben növeli a szalma vagy nád vályog elemekhez fűrészpors hozzáadása, valamint a tulajdonságmódosító adalékok (szalma, nád, fűrészpors) 40 térfogat%-os együttes aránya.

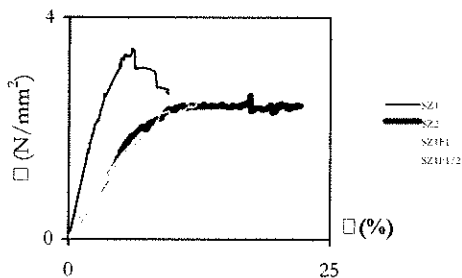
Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy a fűrészpors tartalmú, illetve a 40 térfogat% tulajdonságmódosító anyag tartalmú falazóelemek, és az ilyen falazóelemekből épült falszerkezetek lassabban száradnak ki, ezért hosszabb száradási időt kell biztosítani az építés közben.

### 3.1.2 A falazóelemeken elvégzett nyomószilárdsági és alakváltozási vizsgálatok

A nyomókísérleteket parafalapok közé helyezett falazóelemen végeztem. A terhelés alatt az összenyomás sebességét vettük fel állandónak, értéke 5 mm/min volt. Az alakváltozást 50 mm-es határig útdóval, míg a nyomóerő nagyságát 200 kN-os határig erőmérővel mértük. Az így kapott adatokat számítógéppel rögzítettük (3. ábra).



3. ábra: A nyomószilárdság vizsgálata



4. ábra: A különböző összetételű szalma vályog mintákon kapott nyomófeszültség-fajlagos összenyomódás diagramok

A nyolc különböző összetételű vályog falazóelem nyomószilárdság vizsgálatakor megállapítottam, hogy a tulajdonságmódosító adalékok mennyisége és összetétele befolyásolja a vályog falazóelemek nyomószilárdságát és alakváltozási képességét.

A szalma és a nád vályog falazóelemeknek nyomószilárdsági vizsgálatai alapján megállapítható, hogy a szalma vályog falazóelemek kisebb feszültség hatására mentek tönkre, mint a nád vályog falazóelemek.

A szalma vályog falazóelemek nyomószilárdsága jelentősen lecsökken, és alakváltozó képessége megnő, ha a tulajdonságmódosító anyagok térfogataránya 25 térfogat%-nál nagyobb. Ugyanez állapítható meg, ha a szalma tulajdonságmódosító anyag mellett fűrészpor is van a vizsgált vályog falazóelemekben. A fűrészpor adagolás viszont kedvezően befolyásolja a falazóelemek nyomószilárdságát és alakváltozási képességét, ha az összes tulajdonságmódosító anyagok térfogataránya 40 térfogat%, bár a különbség nem jelentős.

A nád vályog falazóelemek alakváltozási képessége jelentősen megnő, ha a tulajdonságmódosító anyagok összes aránya legalább 25 térfogat%. Ha a tulajdonságmódosító anyagok térfogataránya 40 térfogat%, akkor a fűrészpor adagolás növeli a falazóelemek nyomószilárdságát, és akkor a különbség már jelentős a 25 térfogat% tulajdonságmódosító anyagú falazóelemekhez képest.

### 1/b. tézis:

Kísérletekkel meghatároztam, hogy a *szalma*, a *nád* és a *fűrészpor* adalékok hogyan módosítják a vályog falazóelemek nyomószilárdságát és alakváltozását.

Bővebben:

Kísérletekkel igazoltam, hogy azonos mennyiségű fűrészpor adagolásnak más a hatása a *szalma* és a *nád vályog falazóelemekre*.

Kísérletekkel igazoltam, hogy a *szalma vályog falazóelemek* nyomószilárdságát a fűrészpor hozzáadása, valamint a tulajdonságmódosító adalékok 40 térfogat%-os együttes arány lecsökkenti a 25 térfogat%-os szalma vályoghoz képest.

Kísérletekkel igazoltam, hogy a *nád vályog* anyagú falazóelemek esetén a fűrészpor hozzáadása növeli a falazóelemek nyomószilárdságát és összenyomódási képességét, ha a tulajdonságmódosítók együttes aránya 40 térfogat% a 25 térfogat%-os nád vályoghoz képest.

Kísérletekkel igazoltam, hogy a *szalma vályog* és a *nád vályog falazóelemek* alakváltozási képessége minden esetben nő a tulajdonságmódosító adalékok (szalma, illetve nád, fűrészpor) mennyiségének növelésével.

A fenti megállapításokat a 3. táblázatban foglaltam össze.

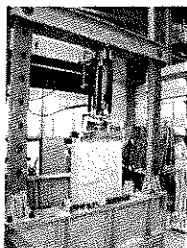
Többlet anyag	Kiindulási anyagok	Nyomószilárdság változás	
		Szalma (~25 térfogat%)	nád (~25 térfogat%)
szalma (~15 térfogat%)		csökken	-
nád (~15 térfogat%)		-	csökken
fűrészpor (~15 térfogat%)		csökken	nő
fűrészpor (~8 térfogat%)		csökken	nem változik

3. táblázat: A tulajdonságmódosító anyagok hatása a falazóelemek nyomószilárdságára

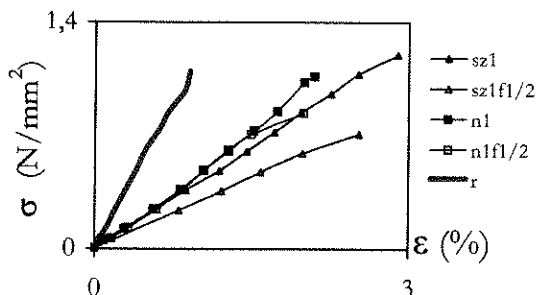
### 3.1.3 A vályog falelemek nyomószilárdság vizsgálata

A 2. kísérletsorozatban öt különböző összetételű vályog falazóelemből épített falelemek teherbírását vizsgáltam laboratóriumi körülmények között. Minden eltérő falazóelem típusból 3-3 darab falelem készült. A törési vizsgálat előtt a teherelosztó lap négy sarkába milliméter beosztású léptéket rögzítettem. Az egyes teherlépcsőkhöz tartozóan teodolittal olvastam le a négy sarokban végbement alakváltozást (5. ábra). A mérési adatokból kiszámítottam a feszültség-alakváltozás

mértékét, a különböző összetételű falazóelemekből épült falelemeken kapott átlagos értékeket a 6. ábrán mutatom be.



5. ábra: A falelem vizsgálat közben



6. ábra: A falelemek feszültség alakváltozás diagramjai

A tisztán agyag falazóelemekből készített (referencia) falelemeknek volt a legkisebb az alakváltozása. Legnagyobb az alakváltozása a szalma vályog falazóelemből épített falelemnek volt a nád vályog kevertéké a kettő közé esett.

Legnagyobb nyomószilárdsága a szalma vályog falazóelemből készült falazatoknak van.

1/c. tézis:

**Kísérletekkel kimutattam, hogy a szalma, a nád és a fűrészpor hozzáadása hogyan módosítja a vályog falelemek nyomószilárdságát és alakváltozási képességét.**

Bővebben:

**Kísérletekkel igazoltam, hogy a falazóelemek anyagába kevert 25 térfogat% szalma a falelem nyomószilárdságát megnöveli a tulajdonságmódosító anyag nélküli falazóelemből épült falelemhez képest.**

**Kísérletekkel igazoltam, hogy a falazóelemekhez 25 térfogat% nád hozzáadása a falelem nyomószilárdságát nem befolyásolja a tulajdonságmódosító anyag nélküli falazóelemből épült falelemhez képest.**

**Kísérletekkel igazoltam, hogy ha a 25 térfogat% tulajdonságmódosító anyagú (szalma, nád) falazóelemek többlet fűrészport is tartalmaznak, akkor a falelem nyomószilárdsága minden esetben nagymértékben csökkent.**

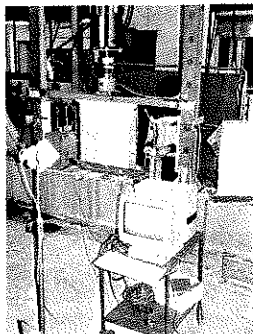
**Kísérletekkel igazoltam, hogy a legalább 25 térfogat% tulajdonságmódosító (szalma, nád és ezekhez adott többlet fűrészpor) tartalmú falazóelemekből épült falelem alakváltozó képessége minden esetben nagyobb, mint a tulajdonságmódosító anyag nélküli falazóelemből épült falelemé.**

A fenti eredményeket a 4. táblázatban foglaltam össze.

	A falazóelem összetétele				
	Agyag	Szalma vályog*	Szalma vályog fűrészporral**	Nád vályog*	Nád vályog fűrészporral**
Szilárdság	referencia	nő	csökken	nem változik	csökken
Alakváltozási képesség	referencia	nő	nő	nő	nő

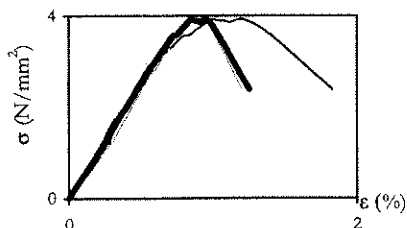
4. táblázat: A tulajdonságmódosító anyagok hatása a falelemek nyomószilárdságára és alakváltozási képességére (\*~ 25 térfogat %, \*\*~ 33 térfogat % tulajdonságmódosító arány)

A 3. kísérletsorozatban a törési vizsgálat előtt a teherelosztó lap három pontjára útdókat rögzítettem, amelyeket a mérőberendezéshez csatlakoztattam. A terhelés teherlépcsőkben történt: a várható törőerő egy hatodánál, egy harmadánál és felénél megálltunk és 0,001 mm pontosságú deforméterrel hét helyen mértük a vízszintes és függőleges alakváltozást. A vizsgálatot a 7. ábra mutatja be. A mérési adatokból kiszámítottam a feszültség-alakváltozás értékpárokat. A 8. ábrán az egyik falelem mérési eredményét mutatom be. A vékony vonallal a három mérési hely adatait, vastag fekete vonallal a mért értékek átlagát rajzoltam meg.



a.)

7. ábra: A laboratóriumi vizsgálat bemutatása



b.)



8. ábra: a.) A falelem feszültség-alakváltozás diagrammjai  
b.) A mérési helyek alaprajza

2/a. tézis:

A vályog falelemek kísérleti nyomószilárdság vizsgálata során megállapítottam, hogy a vályogfal anyaga alakváltozásra fellágyuló anyagmodellnek megfelelően viselkedik (8. és 9. ábra).

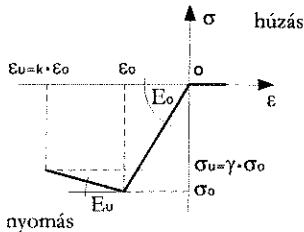
2/b. tézis:

Az anyagtani és nyomószilárdsági laboratóriumi kísérletek alapján megállapítottam, hogy a vályog falazóelemek és a falelemek vizsgálatára használhatók az egyéb anyagú falazóelemekre és falelemekre vonatkozó szabványokban megadott eljárások. Így a vályog falazóelem, falelem az egyéb anyagú falazatokkal azonos módon vizsgálható. Nem szükséges a vályog falazóelemre, falelemre vonatkozóan külön szabványokat készíteni.

### 3.2 Vályogfalak teherbírásának elméleti vizsgálata

A laboratóriumban végzett falelem kísérletek alapján megállapítható, hogy a vályog falazatok viselkedését az alakváltozásra fellágyuló anyagmodell írja le. Ezek a vizsgálatok és ez az anyagmodell adták az alapját elméleti teherbírasi vizsgálataimnak. Az alakváltozásra fellágyuló anyagmodell (9. ábra) esetén a maximális feszültség elérésekor az anyag még nem megy tönkre. A maximális feszültség elérése után a növekvő alakváltozáshoz csökkenő feszültség érték tartozik. Az anyag tönkremenetele a törési összenyomódás elérésekor következik be.





$$\gamma = \frac{\sigma_u}{\sigma_0}; 0 \leq \gamma \leq 1,0$$

$$k = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_0}; k \geq 1,0$$

$$c = \frac{1-\gamma}{k-1}$$

$$E_u = c \cdot E_0$$

9. ábra: Az anyagmodell megadó feszültségi ábra és a jellemző paraméterek

### 3.3.1 A vályog falelem keresztmetszetének teherbírási vonala

A fal teherbírás vizsgálatához szükség van a keresztmetszet teherbírásának meghatározására. Megvizsgáltam, hogy az alakváltozásra fellágyuló anyagmodell miként befolyásolja a keresztmetszet teherbírását. A teherbírasi vonal mellett vizsgáltam a keresztmetszet egyéb jellemzőjét, mint például a magáv határát is.

Számítási eljárást adtam az alakváltozásra fellágyuló, csak nyomásnak ellenálló anyagú keresztmetszet teherbírasi vonalának meghatározására.

A *keresztmetszet teherbírását* úgy értelmeztem, hogy a teherbírás az adott normál erőhöz, vagy adott külpontossághoz tartozó legnagyobb nyomatékokat, illetve normál erő-nyomaték párt jelenti függetlenül attól, hogy az alakváltozás eléri-e a törési összenyomódás értékét, vagy sem.

A *teherbírasi vonal* azon összetartozó nyomaték-normálereő pontpárok összessége, amely az adott normál erőhöz, vagy adott külpontossághoz tartozó legnagyobb nyomatékokat, illetve normál erő-nyomaték párt jelenti függetlenül attól, hogy az alakváltozás eléri-e a törési összenyomódás értékét, vagy sem.

#### 3. tézis:

Számítási módszert adtam a nyomásra fellágyuló, húzószilárdság nélküli anyagú vályog falelem és fal keresztmetszet teherbírásának meghatározására. Igazoltam, hogy az alakváltozásra fellágyuló anyagmodell esetén meghatározható teherbírás, és teherbírasi vonal általában nem a törési összenyomódáshoz tartozó állapotnak felel meg.

Kimutattam, hogy a keresztmetszet teherbírása minden esetben nagyobb, mint a lineárisan rugalmas és mindig kisebb, mint a tökéletesen képlékeny anyagú keresztmetszetek teherbírása. A lineárisan rugalmas anyagmodell alkalmazása a biztonság javára, míg a tökéletesen képlékeny anyagmodell használata a biztonság kárára közelíti a falazat teherbírását.

Vizsgáltam a teherbírasi vonal jellegzetes tulajdonságait is (10. ábra).

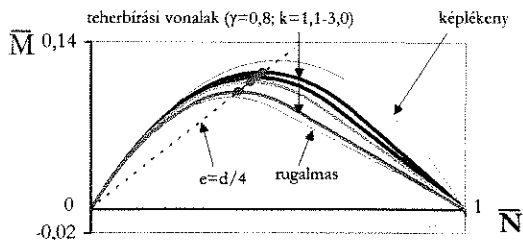
#### 3/a). tézis:

Bebizonyítottam, hogy a lineárisan rugalmas, illetve tökéletesen képlékeny anyagmodellhez hasonlóan, a teherbírasi vonal nyomatéki maximuma alakváltozásra fellágyuló anyagmodell esetén is a keresztmetszet vastagságának negyedéhez tartozó külpontosságnál van (10. ábra).

A numerikus vizsgálatok azt mutatták, hogy az alakváltozásra fellágyuló ág paraméterei befolyásolják a teherbírasi vonal maximum értékeit. A nagyobb törési összenyomódás növeli az alakváltozásra fellágyuló anyagú keresztmetszet teherbírását. Laposabb alakváltozásra fellágyuló ág szintén növeli a keresztmetszet teherbírását.

$$\bar{N} = \frac{N}{h \cdot d \cdot \sigma_o}$$

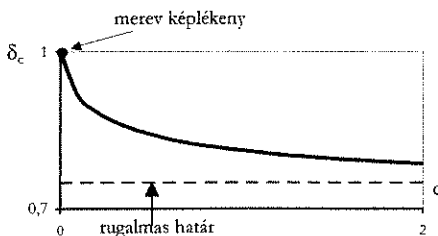
$$\bar{M} = \frac{M}{h \cdot d^2 \cdot \sigma_o}$$



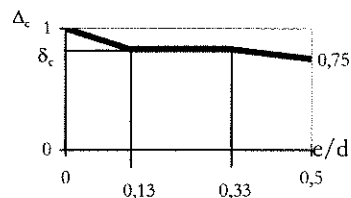
10. ábra: A teherbírási vonal maximuma  $e=d/4$ -hez tartozik. A teherbírási vonalak paramétereit:  $\gamma$ =állandó=0,8,  $k$ =változó ( $k=1,1; 1,5; 2,0; 3,0$ )

### 3/b). tézis:

Megállapítottam, hogy az alakváltozásra fellágyuló anyagú keresztmetszet teherbírási vonala egyszerűen előállítható a tökéletesen képlékeny anyagú keresztmetszet teherbírási vonalából  $0,13 < e/d < 0,33$  kiütpontosság értékek között, azt a „ $c$ ” paraméterhez rendelt csökkentő tényezővel ( $\delta_c$ ) megszorozva. A  $c \cdot \delta_c$  összefüggést grafikusan megadtam (11. ábra). Az átszámítási szorzót ( $\Delta_c$ )  $e/d < 0,13$  kiütpontosságnál „ $\delta_c$ ” és 1,0 között,  $0,5 > e/d > 0,33$  kiütpontosság esetén „ $\delta_c$ ” és 0,75 között interpolálni kell (11-12. ábra).



11. ábra: A merev-tökéletesen képlékeny és az alakváltozásra fellágyuló anyagmodellrel számítható teherbírás aránya ( $\delta_c$ ), ha  $0,13 < e/d < 0,33$  a „ $c$ ” függvényében

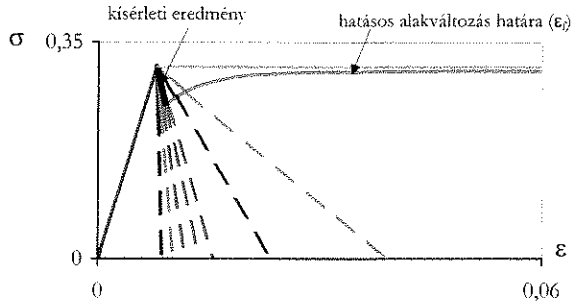


12. ábra: Az átszámítási szorzó függvénye

Számításokat végeztem az alakváltozásra fellágyuló ág és a falazat keresztmetszetének teherbírási vonala közötti összefüggésekre vonatkozóan. Azt vizsgáltam, hogy az alakváltozásra fellágyuló ágon végighaladva mely közbenseő ponthoz (mint korlátozott alakváltozáshoz) tartozik a falazat keresztmetszet teherbírási vonalának maximuma.

### 3/c). tézis:

Megállapítottam, hogy az alakváltozásra fellágyuló ág hossza egy határon túl már nem befolyásolja a teherbírást, illetve a teherbírási vonalat. Az alakváltozásra fellágyuló ág hatásos alakváltozásának ( $\epsilon_{c,1}$ ) neveztem el azt az alakváltozást, ameddig még van eltérés a teherbírási vonalak között (13. ábra).

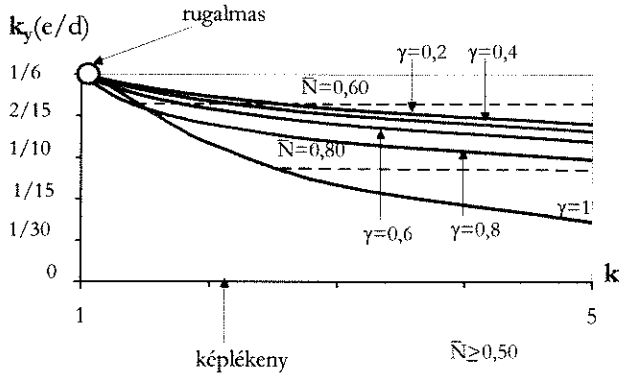


13. ábra: A fellágyuló ág hatásos hossza  
(a szaggatott vonal a teherbírást már nem befolyásoló  $\sigma$ - $\varepsilon$  ábra szakaszt), ( $E_0=40$  kN/cm<sup>2</sup>)

A teherbírási vonal meghatározására megadott módszer alapján vizsgáltam a magcsáv méretét. A falazat keresztmetszetének magcsáv határán azon nyomóerő dőléspontok mértani helyét (külpontosságot ( $k_y$ )) értem, amelyeken működő erő esetén a semleges tengely érinti a keresztmetszetet. Azt a normálerőt tekintem a magcsáv határához tartozónak, amelynél a külpontosság növelése során a teherbírási vonal eléréseig a keresztmetszet éppén repedésmentes.

#### 4. tézis:

Módszert adtam az alakváltozásra fellágyuló anyagú keresztmetszet magcsávjának meghatározására. Megállapítottam, hogy a magcsáv mérete változó, mérete függ a normálerő nagyságától valamint az alakváltozásra fellágyuló ág hosszától és meredekségétől ( $k, \gamma$ ) (14. ábra).



14. ábra: A magcsáv méretének ( $k_y$ ) változása a külpontosság és az alakváltozásra fellágyuló anyagmodell paramétereinek függvényében ( $\gamma=0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1$ )

A  $\bar{M}$  -  $\bar{N}$  koordináta-rendszerben a magcsáv változásának vizsgálatokor négy jellegzetes szakasz különböztethető meg (15. ábra).

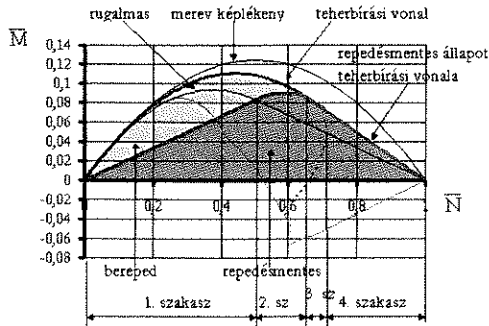
Az első szakasz: a maximális fajlagos normálerő feléig ( $\bar{N}=0,5$ ) tart, ebben a szakaszban a magcsáv mérete megegyezik a tökéletesen rugalmas anyagú keresztmetszet magcsáv méretével, ez a keresztmetszet magasságának hatodáig tart ( $k_y=d/6$ ). Ebben a szakaszban a keresztmetszet berepedése már jóval korábban bekövetkezik, mint a teherbírási vonal elérése, tehát a

keresztmetszet teherbírásának kimerülését már korán repedés jelzi. A  $k$  értéke nem függ a normálerő szintjétől.

A *második szakaszban*: a magász mérete már nem állandó, fokozatosan csökken a normálerő növekedésével. Ebben a szakaszban egy állandó normálerő szintet vizsgálva azt tapasztaltam, hogy a keresztmetszet a teherbírasi vonal elérésekor már berepedt, de a repedésmentes állapothoz tartozó teherbírasi közel esik ezeknél a normálerő szinteknél a teherbírashoz. A repedés megjelenése gyakorlatilag a teherbírasi elérését jelenti. A  $k$  értéke függ a normálerő szintjétől.

A *harmadik szakaszban*: állandó normálerő esetén a teherbírasi vonal eléréséig nem reped be a keresztmetszet, csak a tehermentesítést követően. Ebben az esetben a teherbírasi kimerülését nem jelzi előre repedés. A második és harmadik szakasz határa a teherbírasi vonalon van, ehhez olyan feszültségi ábra tartozik, hogy a semleges tengely éppen érinti a keresztmetszetet. A második és harmadik szakasz határa nem állandó értékű, nagysága függ az alakváltozásra fellágyuló ág paramétereitől.

A *negyedik szakaszban*: a terhelés és leterhelés során nem reped be a keresztmetszet. Bebizonyítottam, hogy a harmadik és a negyedik szakasz határa a lineárisan rugalmas anyagmodellű teherbírasi vonalon található (15. ábra).



15. ábra: A repedésmentes teherbírasi vonal és a teherbírasi vonal kapcsolata

### 3.3.2 A külpontosan terhelt vályogfalak teherbírásának vizsgálata

Vizsgáltam a külpontosan terhelt fal teherbírását illetve azt, hogy a fal két végén lévő normálerő egymáshoz viszonyított helyzete hogyan befolyásolja a fal teherbírását. Vizsgáltam, hogy a fal tetején ható erő helyénc változtatása a fal alján lévő erőhöz képest hogyan befolyásolja a fal teherbírását. Vizsgáltam az alakváltozásra fellágyuló anyagmodell fellágyuló ágának hatását is a teherbírásra. A fal teherbírasi vizsgálatát elvégeztem egyenes és görbe kezdeti faltengellyel is. A kapott eredményeket összehasonlítottam a szakirodalomban található lineárisan rugalmas és rugalmas-képlekeny anyagmodellből számítható értékekkel.

A *fal teherbírasi* az a legnagyobb normálerő,

- 1.) amelynél a falzat valamely keresztmetszetén az igénybevételek elérik a vizsgált keresztmetszet teherbírását, ez a *szilárdsági tönkremenetel*.
- 2.) amelynél a normálerő elmozdulás diagramnak maximuma van, ebben az esetben a teherbírasi elérése nem jelenti feltétlenül az anyag tönkremenetelét, ez a *stabilitásvesztés*.

A fal teherbírásának kimérülésére két tönkremeneteli esetet lehet megkülönböztetni. A kis karcsúságok ( $\lambda < 7$ ) tartományában szilárdsági-, a közepes karcsúságoknál ( $7 < \lambda < 15$ ) és nagy karcsúságok ( $15 < \lambda < 30$ ) tartományában stabilitásvesztési tönkremenetel tapasztalható.

A fal terhelése olyan, hogy a vízszintesen megtámasztott fal tetején és alján állandó külpontosságú fokozatosan növekvő nyomóerő működik.

#### 5. tézis:

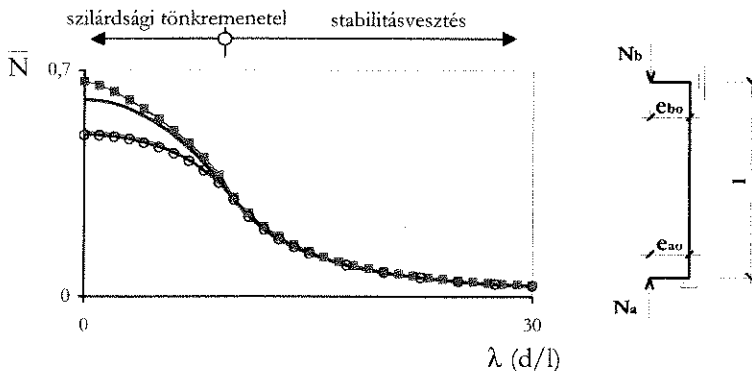
Módszert adtam alakváltozásra fellágyuló anyagmodellnek megfelelően viselkedő vályog falak teherbírásának meghatározására másodrendű elmélet alkalmazásával.

Differencia módszert használtam a teherbírás meghatározására. A módszer figyelembe veszi a szilárdsági- és stabilitásvesztési tönkremenetel lehetőségét is.

#### 5/a). tézis:

A javasolt módszerrel végzett numerikus vizsgálataim szerint kis karcsúságú falak ( $\lambda \leq 7$ ) (azaz szilárdsági tönkremenetel) esetén az alakváltozásra fellágyuló anyagú falnak a teherbírása nagyobb, mint a lineárisan rugalmas anyagú falé és kisebb, mint a képlékeny anyagú falé. A közepes ( $7 < \lambda \leq 15$ ) és nagy karcsúságok ( $15 < \lambda < 30$ ) esetén a teherbírás egybeesik mindhárom modellből számított értékekkel (16. ábra).

A vizsgálatokban megállapítottam, hogy gyakorlatban a vályogfalak ( $\lambda < 10$ ) számításánál figyelembe kell venni az alakváltozásra fellágyuló anyagmodellel számítható teherbírást, mert ebben a tartományban jelentős eltérés lehet a teherbírásban. Numerikusan bizonyítottam, hogy a lineárisan rugalmas anyagmodell alkalmazása a biztonság javára, míg a tökéletesen képlékeny anyagmodell használata a biztonság kárára közelíti a fal teherbírását.



16. ábra: A különböző anyagú falak teherbírása  $e_{a0}=e_{b0}=d/6$ -os külpontosság esetén ( $F_{a0}=40 \text{ kN/cm}^2$ )  
 (Jelmagyarázat: .....  $k=1,1; \gamma=0,2$ ; —————  $k=3,0; \gamma=0,8$ ; —○— lineárisan rugalmas  
 (Yokel, 1971), —■— rugalmas-képlékeny (Kőrössi, 1977))

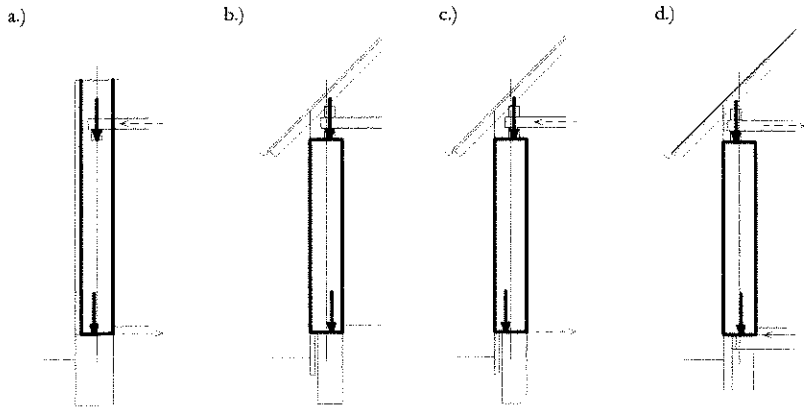
A megadott módszer szerint vizsgáltam, hogy a falvégek csomóponti képzése hogyan befolyásolja a falak teherbírását.

#### 5/b). tézis:

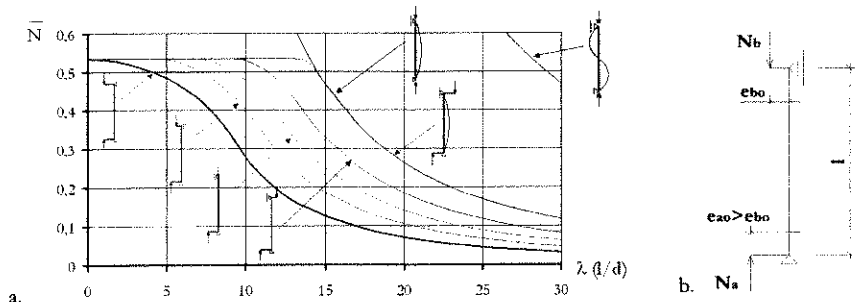
Megállapítottam, hogy nem elmozduló (megtámasztott) csomópontú vályogfalaknál található a vályogfal alsó és felső végén olyan csomóponti kialakítás, ami kedvezően befolyásolja a fal teherbírását (17-18. ábra).

A fal tetején és alján ható normálró egymáshoz viszonyított külpontosságának megváltoztatása (az egyik külpontosság értékének csökkentése és/vagy irányának megváltoztatása) kedvezően befolyásolhatja (növeli) a fal teherbírását.

Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy a fal alsó és felső csomópontjának átgondolt kialakításával (az erő bevezetésének és feltámasztásának helyét el kell tolni egymáshoz képest) növelhető a fal teherbírása. Ez a megállapítás akkor is igaz, ha a terhelés előtt a fal tetejéje nem egyenes, hanem kezdeti görbeséggel rendelkezik.



17. ábra: Vályogfalak csomópontjainak kialakítási lehetőségei



18/a. ábra: A fal teherbírása eltérő  $e_{b0}$  külpontosságok esetén a kezdeti görbeség figyelembevételével  
 ( $e_{a0}=d/6$ ,  $k=1,1453$ ,  $\gamma=0,8105$ ,  $E_c=40 \text{ kN/cm}^2$ )

18/b. ábra: Jelölések

5/c). tézis:

Javaslatot adtam vályogfalak külpontos nyomásra történő méretezésére másodrendű elmélettel az alakváltozásra fellágyuló anyagmodell szerinti viselkedésnek megfelelően. A javasolt vályogfal teherbírás-számítási módszer lehetővé teszi a csomópontképzés kedvező hatásának, a fal kezdeti görbeségének és közelítő módon a kúszásnak a figyelembevételét is.

A javasolt méretezés lépései:

- a fal alján és tetején ható erő kezdeti külpontosságának meghatározása (18/b. ábra),
- a kezdeti külpontosság módosítása a kúszás okozta külpontosság közelítő értékével,
- egyenértékű külpontosság számítása a kezdeti külpontosságokhoz

$$e_{eq} = C_m \cdot e_{a0},$$

$$C_m = 0,6 + 0,4 \cdot \frac{e_{a0}}{e_{b0}}$$

- a teherbírás meghatározása azonos nagyságú és irányú egyenértékű külpontossághoz a kezdeti görbeséget is figyelembevevő  $\bar{N} = \bar{N}(\lambda, e_{eq})$  diagramokból, táblázatokból.  
(Pl.: 18/a. ábra vastag vonala)

## 4. ÖSSZEFOGLALÁS

Laboratóriumi vizsgálatokat végeztem az eltérő összetételű vályog falazóelemek anyagtani tulajdonságainak megismerésére. Megvizsgáltam a falelemek nyomószilárdsági jellemzőit. Meghatároztam egy, a vályog falelemet leíró alakváltozásra fellágyuló anyagmodellt.

Numerikusan vizsgáltam a vályog falelemek keresztmetszet teherbírasi vonalát és jellegzetes tulajdonságait alakváltozásra fellágyuló anyagmodellel. Számításokat végeztem az alakváltozásra fellágyuló ág és a falazat keresztmetszetének teherbírasi vonala közötti összefüggés vizsgálatára. Megállapítottam, hogy egy határon túl már nem befolyásolja a teherbírasi alakváltozásra fellágyuló ág hossza. Azt az alakváltozást, ameddig még van eltérés a teherbírasi vonalak ( $E_0$ =állandó) között, hatásos alakváltozásnak ( $\epsilon_{e0}$ ) neveztem el.

Bebizonyítottam, hogy a teherbírasi vonal maximuma a  $d/4$  külpontossághoz tartozik. Vizsgáltam a magbív méretének változását, és megállapítottam, hogy a magbív mérete függ a normálerőtől, valamint az alakváltozásra fellágyuló ág hosszától és meredekségétől.

Vizsgáltam a vízszintesen nem elmozduló csomópontú, külpontosan terhelt fal teherbírasi, illetve azt, hogy a fal két végén levő normálerő egymáshoz viszonyított helyzete hogyan befolyásolja a fal teherbírasi. Megállapítottam, hogy a fal tetején ható erő helyének változtatása a fal alján levő erőhöz képest növelheti a fal teherbírasi. A gyakorlatban a vályogfalak karcsúsága legfeljebb 10 lehet, ezért ebben a tartományban az alakváltozásra fellágyuló anyagmodellel számítható teherbírasi eltér a lineárisan rugalmas és a tökéletesen képlékeny anyagmodellből kapott értékekkel.

Megállapítottam, hogy az alakváltozásra fellágyuló anyagmodell a szilárdsági tönkremenetelhez tartozó karcsúságoknál növeli meg a falak teherbírasi a lineárisan rugalmas anyagú falakhoz viszonyítva, a tökéletesen képlékeny anyagú falakhoz képest pedig kisebb teherbírasi ad. A fal teherbírasi vizsgálatát elvégeztem egyenes és görbe kezdeti faltengellyel is.

Javaslatot tettem a vályogfalak egy lehetséges gyakorlati méretezési módszerre is.

## 5. AZ ÉRTEKEZÉS EREDMÉNYEINEK HASZNOSÍTÁSI LEHETŐSÉGEI

Az anyagtani és szilárdsági kísérleteket vályog falazóelemeken és az azokból készült falelemeken végeztem. Az elméleti teherbírasi vizsgálatokat a falelem keresztmetszetére és falra készítettem el. További kutatási célom, hogy az elméleti falvizsgálatokat összehasonlítsam kísérleti falvizsgálatok eredményeivel, valamint a vályogfalak lassú alakváltozási viselkedését is megismerjem.

Mindezeket túl a fal teherbírasi vonalakat más alakváltozásra fellágyuló ág anyagtani paramétereivel is meg kívánom határozni.

## 6. HIVATKOZÁSOK A TÉZISFÜZETBEN

- KÓRÖSSI T. *Húzószilárdsággal nem rendelkező nyomott rudak teherbírása*, Doktori értekezés, 1977
- STEINGASS P. *Moderner Lehbau 2002, Internationale Beiträge zum modernen Lehbau*, Fraunhofer IRB Verlag, 2002
- YOKEL, F. Y. *Stability and load capacity of members with no tensile strength*, Proc ASCE 97 S17, 1971

## 7. PUBLIKÁCIÓK

- Csicsely Á.: *What one should know about earth architecture?*, BULLETIN 2000 (BME Építészmérnöki Kar, Évkönyv), 2000, 203-214. old.
- Csicsely Á. – Józsa Zs.: *Drying shrinkage of adobe-clay*, BULLETIN 2001 (BME Építészmérnöki Kar, Évkönyv), 2001,
- Csicsely Á.: *Vályogházak- Építés és felújítás*, Építészműhely 2001/1, 11. old.
- Csicsely Á. – Józsa Zs.: *Könnnyűvályog elemek laboratóriumi vizsgálatai*, Építőanyag, (A Szilikátipari Tudományos Egyesület lapja), 53. évf., 2001/2, 53-57. old.
- Csicsely Á. – Józsa Zs.: *Könnnyűvályog elemek laboratóriumi vizsgálatai*, 5. Történeti Tartószerkezetek Tudományos Ülésszak, Falazott történeti tartószerkezetek, Kolozsvár (magyar nyelvű cikk a konferencia kiadványba), 2001
- Csicsely Á. – Józsa Zs.: *Analysis of Adobe-clay as an Environmentally Compatible Structural Material*, Environmentally Compatible Structures and Structural Materials (ECS) 3<sup>rd</sup> Seminar on ECS, Prága, 2002
- Csicsely Á. – Józsa Zs.: *Clay Walls in Mirror of Thermal Technique Passive and Low Energy Architecture*, Passive and Low Energy Architecture konferencia, Toulouse-ban publikáció a konferencia kiadványban, 2002
- Csicsely Á.: *Szemelvények a vályog- és földépítés történetéből*, Építés- Építészettudomány XXX. (3-4), Akadémia Kiadó, Budapest, lektorált, magyar nyelvű cikk, 2002, 273-287. old.
- Csicsely Á. – Józsa Zs.: *Clay Walls in Mirror of Thermal Technique Installation for Building and the Ambiental Comfort*, Konferencia Temesváron, (publikáció a konferencia kiadványban), 2003
- Csicsely Á. – Józsa Zs. – Sajtos I.: *Vályogfalazatok és nyomószilárdsági vizsgálatai*, Építőanyag, (A Szilikátipari Tudományos Egyesület lapja), 55. évf. 2003. 3. szám, 118-124. old.

### *Előadások*

- Csicsely Á. – Medgyasszay P.: *Earth Construction in the Data Base on Ecological Building*, Poszterelőadás a TERRA 2000 8<sup>th</sup> International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architecture, 2000
- Csicsely Á.: *4 hagyományos, kis energiazigényű falszerkezetek reinkarnációja*, Poszterelőadás, Ipari Nyílt Nap a Műgyetemen, 2001
- Csicsely Á. – Józsa Zs.: *Drying shrinkage of adobe-clay*, II. Bauphysik Symposium, Essen (angol nyelvű előadás), 2001
- Csicsely Á. – Józsa Zs.: *Könnnyűvályog elemek laboratóriumi vizsgálatai*, 5. Történeti Tartószerkezetek Tudományos Ülésszak, Falazott történeti tartószerkezetek, Kolozsvár (magyar nyelvű előadás), 2001
- Csicsely Á. – Józsa Zs.: *Analysis of Adobe-clay as an Environmentally Compatible Structural Material Environmentally Compatible Structures and Structural Materials (ECS) 3<sup>rd</sup> Seminar on ECS*, Prága (angol nyelvű előadás), 2002
- Csicsely Á. – Józsa Zs.: *Clay Walls in Mirror of Thermal Technique*, Passive and Low Energy Architecture konferencia, Toulouse-ban (angol nyelvű poszter-előadás), 2002
- Csicsely Á. – Józsa Zs. – Sajtos I.: *Vályog falazatok teherbírás vizsgálata*, IX. Magyar Mechanika Konferencia, Miskolc (magyar nyelvű előadás), 2003
- Csicsely Á. – Józsa Zs. – Sajtos I.: *Analysis of adobe-clay as an environmental-friendly structural material*, V. Országos Anyagtudományi és Anyagvizsgálói Konferencia és Kiállítás, Balatonfüred, 2005