

**НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ**

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Марка Маринковића

Одлуком Наставно научног већа од 05.07.2018. године (одлука бр. 124/9-18 од 06.07.2018) именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Марка Маринковића, маг. инж. грађ., под насловом:

**INNOVATIVE SYSTEM FOR SEISMIC RESISTANT MASONRY INFILLS IN  
REINFORCED CONCRETE FRAME STRUCTURES**

Наслов на српском језику:

**ИНОВАТИВНИ СИСТЕМ ЗА СЕИЗМИЧКИ ОТПОРНУ ЗИДАНУ ИСПУНУ У  
АРМИРАНОБЕТОНСКИМ РАМОВСКИМ КОНСТРУКЦИЈАМА**

После прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

**РЕФЕРАТ**

**1. УВОД**

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

На седници Већа Катедре за техничку механику и теорију конструкција одржаној 22.03.2018. Марко Маринковић је јавно излагао предложену тему докторске дисертације под насловом „Innovative system for seismic resistant masonry infills in reinforced concrete frame structures“ (на српском језику „Иновативни систем за сеизмички отпорну зидану испуну у армиранобетонским рамовским конструкцијама“). Комисија коју је образовало Веће Катедре прихватила је предложену тему и предложила кандидату да тему пријави Наставно-научном већу Грађевинског факултета.

Одлуком Наставно-научног већа Грађевинског факултета бр. 124/3 од 05.04.2018. године, одређена је Комисија за оцену научне заснованости теме докторске дисертације под насловом „Innovative system for seismic resistant masonry infills in reinforced concrete frame structures“ (на српском језику „Иновативни систем за сеизмички отпорну зидану испуну у армиранобетонским рамовским конструкцијама“) у саставу Prof. Dr.-Ing. Christoph Butenweg (Center for Wind and Earthquake Engineering, RWTH Aachen University), проф. др Растислав Мандић и в. проф. др Ратко Салатић. Позитиван извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације усвојен је на седници Наставно-научног већа Грађевинског факултета одржаној 10.05.2018. године (одлука бр. 124/5-18 од 11.05.2018. године). Веће научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду на седници одржаној 22.05.2018. (одлука бр. 61206-2167/2-18 од 22.05.2018. године) усвојило је предлог теме докторске дисертације кандидата Марка Маринковића.

Кандидат је урађену докторску дисертацију предао Служби за студентска питања Грађевинског факултета 28.06.2018. године.

## 1.2. Научна област дисертације

Тема докторске дисертације припада научној области Грађевинарство и ужој научној области Техничка механика и теорија конструкција, која је дефинисана Статутом Грађевинског факултета Универзитета у Београду. За менторе дисертације одређени су Prof. Dr.-Ing. Christoph Butenweg, редовни професор Универзитета у Ахену, Немачка (Center for Wind and Earthquake Engineering, RWTH Aachen University) и др Растислав Мандић, дипл.грађ.инж. редовни професор Грађевинског факултета Универзитета у Београду.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Марко Маринковић је рођен 04.07.1988. године у Београду, где је завршио основну школу и гимназију.

Основне академске студије је уписао на Грађевинском факултету Универзитета у Београду 2007. године на Одсеку за конструкције, где је стекао звање дипломираног инжењера грађевинарства 2011. године са просечном оценом 8,90 и оценом 10 на дипломском раду.

Мастер академске студије је уписао на Грађевинском факултету Универзитета у Београду 2011. године на Одсеку за конструкције, где је стекао звање мастер инжењера грађевинарства 2012. године са просечном оценом 9,57 и оценом 10 на мастер раду под називом „Динамичке карактеристике армиранобетонских скелетних конструкција са зиданом испуном“.

Докторске академске студије је уписао на Грађевинском факултету Универзитета у Београду 2012. године на модулу Грађевинарство, где је положио све испите предвиђене студијским програмом са просечном оценом 9,63.

У периоду јул-септембар 2011. године био је на стручној пракси у Аустрији у компанији ALPINE Bau GmbH.

Као стипендиста „Фондације др Зоран Ђинђић“, у периоду од јула до октобра 2012. године био је на стручној пракси у компанији „Herrenknecht AG“ у Немачкој.

У периоду октобар-децембар 2012. године радио је као студент демонстратор на предметима Динамика конструкција и земљотресно инжењерство, Стабилност конструкција и Основе спрегнутих конструкција.

Од јануара 2013. године одлуком Изборног већа Грађевинског факултета Универзитета у Београду, изабран је у звање асистента-студента докторских студија за ужу научну област Техничка механика и теорија конструкција. Од тада учествује у настави на више предмета из наведене научне области.

Од 2014. године као стипендиста учествује у међународном програму SEEFORM (South Eastern European Graduate School for Master and Ph.D. Formation in Engineering), који финансира DAAD, Немачка. У оквиру тог програма је за време студијског боравка код Prof. Dr.-Ing. Christoph Butenwega на RWTH Aachen Универзитету радио на докторској тези.

Као аутор и коаутор, до сада је публикувао 13 радова у часописима и зборницима конференција, од чега један у часопису индексираном на СЦИ листи. Публиковани радови презентују резултате истраживања у области земљотресног инжењерства армиранобетонских и зиданих конструкција.

Говори и пише енглески и немачки језик и служи се руским језиком.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација Марка Маринковића под насловом „Innovative system for seismic resistant masonry infills in reinforced concrete frame structures“ (на српском језику „Иновативни

систем за сеизмички отпорну зидану испуну у армиранобетонским рамовским конструкцијама“) садржи укупно 399 страна, од којих је основни текст на 315 страна. Дисертација је писана на енглеском језику и подељена је у девет поглавља:

1. Увод у дисертацију
2. Преглед литературе
3. Предложени систем
4. Експериментална истраживања свих компоненти предложеног система
5. Експериментална истраживања рамова са зиданом испуном
6. Нумеричка анализа
7. Параметарска анализа
8. Концепт прорачуна и економска анализа
9. Закључци и будући рад

Дисертација садржи 276 слика и 49 табела. Списак цитиране литературе садржи 358 наслова. На почетку дисертације је дат резиме на српском и енглеском језику, са кључним речима и УДК бројем. Дисертација садржи два прилога. Биографија аутора дата је на крају дисертације.

Дисертација је технички обликована према упутствима Сената Универзитета у Београду и посебним упутствима за обликовање штампане и електронске верзије доктората. Садржи обавезна поглавља и обрасце: изјава о ауторству, изјава о истоветности електронске и штампане верзије и изјава о коришћењу.

## 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Основни текст разматране докторске дисертације има девет поглавља, преглед коришћене литературе и два прилога. На почетку текста је дат садржај, списак скраћеница и симбола, изјава захвалности, апстракт и списак кључних речи на енглеском и српском језику као и спискови слика и табела.

У уводном поглављу су представљени основни проблеми зидане испуне у армиранобетонским (АБ) рамовским конструкцијама, који се јављају при дејству земљотреса. Представљен је утицај зидане испуне на понашање АБ рамовских конструкција и оштећења која су се јавила у претходним земљотресима. У овом поглављу су дефинисани циљеви, методологија и организација дисертације по поглављима.

У поглављу „Преглед литературе“ прво је представљено понашање АБ конструкција са зиданом испуном при дејству земљотреса, а затим су сумирана експериментална истраживања и сазнања у вези са зиданом испуном. Прегледом литературе су затим обухваћени најзначајнији нумерички модели за прорачун зидане испуне. Након тога су презентовани аналитички приступи за прорачун АБ рамова са зиданом испуном. Такође, представљен је и преглед тренутних прописа и препорука за прорачун зидане испуне. У овом поглављу је посебна пажња посвећена предложеним решењима и системима за побољшање понашања зидане испуне при дејству земљотреса.

Опис предложеног система изолације зидане испуне у односу на АБ рам дат је у поглављу „Предложени систем“. Прво су приказани детаљи везе испуне и АБ рама, као и кораци примене IMES (Innovative Masonry Enclosure System) система, који представља међурешење, а затим су детаљно приказани детаљи везе и кораци примене INODIS (Innovative Decoupled Infill System) система као коначно предложеног решења.

У поглављу „Експериментална истраживања свих компоненти предложеног система“ даје приказ тестова на компонентама предложеног система, као и свим материјалима употребљеним за експерименталне тестове на АБ рамовима са зиданом испуном. Посебан акценат је стављен на испитивање еластомера, материјала који представља главну компоненту предложеног система.

У поглављу „Експериментална истраживања рамова са зиданом испуном“ је описан програм испитивања који је укључивао испитивање осам АБ рамова: један АБ рам без испуне, три АБ рама са традиционално изведеном зиданом испуном, три АБ рама са зиданом испуном и IMES системом и један АБ рам са зиданом испуном и INODIS системом. Детаљно су приказане и објашњене процедуре испитивања узорака, као и начин задавања оптерећења. Дат је опис свих узорака са потребним детаљима, као и опреме за мерење утицаја и понашања узорака. Након тога су приказани резултати експерименталног програма. Прво су приказани резултати испитивања АБ рама, а затим и резултати испитивања (дијаграми сила-померање, деформације/померања испуне управно на раван зида, прслине, оштећења рамова и испуне, промена крутости система, као и дисипација енергије и промене нивоа пригушења) АБ рамова са традиционално изведеном зиданом испуном, АБ рамова са зиданом испуном и IMES системом и АБ рама са зиданом испуном и INODIS системом. Резултати су коментарисани у смислу међусобног поређења резултата различитих система.

У шестом поглављу („Нумеричка анализа“) приказан је нумерички модел развијен у рачунарском програму Abaqus. Прво је приказан приступ моделирања АБ рамова са зиданом испуном. Затим је модел калибриран користећи тестове на компонентама система, након чега је нумерички модел потврђен експерименталним тестовима на АБ рамовима са испуном.

У поглављу „Параметарска анализа“ нумерички модел је искоришћен како би се утврдили главни параметри који утичу на понашање АБ рамова са зиданом испуном и INODIS системом. Након тога је извршена опсежна параметарска анализа обухватајући 144 нумеричка модела који представљају комбинацију различитих вредности главних параметара. За све нумеричке симулације су приказани дијаграми сила-померање.

Осмо поглавље „Концепт прорачуна и економска анализа“ представља део тезе који је најбитнији за инжењерску праксу. На основу резултата експерименталних тестова параметарске анализе приказане, направљен је концепт прорачуна зидане испуне са INODIS системом. Поступак је подељен на верификацију система при оптерећењу у равни и на верификацију система при оптерећењу управно на раван зида. У првом кораку се усваја дебљина и тип INODIS система у зависности од релативног међуспратног померања. Верификација зидане испуне на оптерећење управно на раван зида се врши применом једноставног израза за носивост испуне ван равни. Такође је спроведена и економска анализа примене INODIS система и прорачун трошкова у поређењу са традиционалном испуном.

Општи закључци истраживања, као и препоруке за будућа истраживања су дати у деветом поглављу.

Након списка литературе, у прилозима су дате криве сила-померања за све нумеричке моделе из параметарске анализе, као и улазни подаци за моделе материјала коришћених у нумеричким моделима.

### **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

#### **3.1. Савременост и оригиналност**

АБ рамовске конструкције са зиданом испуном представљају објекте који су значајно заступљени у грађевинској пракси широм света. Међутим, оштећење како испуне тако и носећег система је честа појава при дејству земљотреса, што проузрокује значајне материјалне губитке и трошкове, а некада и губитке живота.

Протеклих неколико деценија, истраживачи су у потрази за проналажењем решења за побољшање понашања зидане испуне при дејству земљотреса. Досадашња истраживања се у далеко највећој мери бавила понашањем традиционалне испуне при дејству оптерећења у равни и управно на раван зида, док је интеракција та два оптерећења као и њихова истовремена апликација испитивана у значајно мањој мери. Што се тиче решења предложених за побољшање понашања зидане испуне, постоје релативно бројна решења за

повећање носивости испуне, док су тек скорије предложена решења за повећање дуктилности или за изолацију зидане испуне од околног рама. Међутим, ниједно решење не пружа поузданост при истовременом дејству обе компоненте оптерећења. Такође, предложена решења су често компликована и скупа за примену у пракси, и не могу се применити за различите типове зидова и блокова/цигли. У том смислу, ова дисертација се бави врло савременим проблемом који се односи на понашање АБ рамова са зиданом испуном – проблемом који постаје све актуелнији и значајнији при пројектовању АБ конструкција. Нарочит допринос дисертације јесу и експериментални резултати испитивања АБ рамова са зиданом испуном, посебно при истовременом дејству обе компоненте оптерећења. У постојећој литератури оваквих истраживања има веома мало. Посебан значај има предложени систем, који представља оригинално решење у грађевинској пракси. Такође, резултати дисертације имају тренутну практичну вредност и могућност примене у пракси.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У изради ове докторске дисертације је коришћено 358 библиографских јединица. Већину референци чине радови објављени у врхунским међународним часописима, попут Construction and Building Materials, Engineering Structures, Bulletin of Earthquake Engineering, Materials and Structures, ACI Structural Journal, као и радови објављени на значајним међународним конференцијама, извештаји истраживачких пројеката и међународни стандарди у области испитивања материјала и пројектовања АБ конструкција са испуном.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Рад у дисертацији је реализован паралелном применом теоријског приступа ослоњеног на податке добијене из литературе и практичног приступа заснованог на сопственом експерименталном и нумеричком истраживању.

Кандидат је рад на докторској дисертацији, полазећи од анализе и синтезе постојећих сазнања и резултата из литературе, засновао на експерименталним и нумеричком анализама. Тежиште овог рада је на експерименталној и нумеричкој анализи и теоријско-аналитичком моделирању. Кандидат се користио основним принципима теорије конструкција и отпорности материјала. Нумеричко моделирање, методом коначних елемената, применио је у параметарској анализи чије резултате једноставном статистичком обрадом користи за предлагање концепта прорачуна АБ рамова са зиданом испуном и INODIS системом.

Наведене методе истраживања су врло савремене и у потпуности примерене за примену у предметном истраживању.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати добијени у оквиру истраживања указују: (1) на значајно смањење носивости АБ рамова са зиданом испуном при истовременом дејству обе компоненте оптерећења и (2) да је могуће побољшати понашање АБ рамова са испуном, применом предложеног система.

Добијени резултати су последица анализа спроведених на резултатима експерименталних и нумеричких анализа. Предложени систем за побољшање понашања АБ рамова са зиданом испуном и прорачунски концепт који су резултат ове дисертације се могу директно применити у пројектовању армиранобетонских конструкција.

### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат се у оквиру своје докторске дисертације бавио изучавањем и критичком анализом доступне литературе, као и планирањем, спровођењем, обрадом и анализом резултата експерименталног и нумеричког истраживања. Кандидат је такође показао способност за

критичку анализу научне литературе, развој и предлагање оригиналних решења која доводе до бољих резултата у односу на оне које карактеришу до сада публикована решења. Систематичним приступом постављеном проблему, повезујући различите сегменте научно-истраживачког рада, Марко Маринковић је успешно решио постављене задатке и доказао да поседује способност за самостални научно-истраживачки рад.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру докторске дисертације Марка Маринковића остварени су следећи научни доприноси:

1. Експериментално је испитано понашање АБ рамова са традиционално изведеном испуном при истовременом дејству оптерећења у равни и управно на раван зида. Показано је да истовремено дејство обе компоненте оптерећења доводи до значајног смањења носивости и деформабилности АБ рамова са зиданом испуном.
2. Предложен је нови оригиналан систем везе зидане испуне и АБ рамова (систем INODIS) чиме је знатно унапређена сеизмичка отпорност АБ рамова са испуном. Кроз нумеричка и експериментална истраживања извршено је поређење понашања рамова са традиционално изведеном испуном и рамова са испуном изолованом применом предложеног система и дата је одговарајућу дискусија добијених резултата.
3. Развијен је нумерички модел за статичку и динамичку анализу АБ рамова са зиданом испуном који се може користити за даљу анализу понашања конструкција овог типа.
4. Развијен је прорачунски концепт за АБ рамове са зиданом испуном и предложеним системом изолације INODIS. Кроз обимна експериментална и нумеричка истраживања је показано који све параметри утичу на понашање рамова са зиданом испуном који су изведени са предложеним системом INODIS. На основу тога је предложен једноставан концепт примењив у пракси.

### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Истраживачки рад Марка Маринковића, маг. инж. грађ. на истраживању понашања армиранобетонских рамова са зиданом испуном при земљотресном оптерећењу је омогућио формулисање новог система за побољшање понашања зидане испуне као и дефинисање прорачунског концепта за његову примену.

У истраживању је спроведен обиман експериментални програм испитивања АБ рамова са зиданом испуном под цикличним оптерећењем који захтева темељне припремне активности и тачно и прецизно спровођење. Добијени резултати омогућавају извођење закључака као и употребу од стране других истраживача.

Испитивања у оквиру дисертације су утврдила значајно боље понашање АБ рамова са зиданом испуном применом INODIS система у односу на АБ рамове са традиционално зиданом испуном. Примена INODIS система довела је до изолације испуне и рама, што је допринело повећању релативног међуспратног померања АБ рама при којем долази до појаве пукотина у испуни као и лома испуне. Применом предложеног система постигнута је поуздана веза рама и испуне при свим комбинацијама оптерећења, онемогућавајући губитак контакта рама и испуне и нагли лом испуне управно на раван зида.

Анализом експерименталних у нумеричких резултата резултата формулисан је прорачунски модел за практичну примену предложеног система. У циљу примену предложеног система за различите случајеве геометрије рама и испуне, као и типове блокова за зидану испуну, за случај испуне са отворима, неопходно је спровођење додатних испитивања.

### 4.3. Verifikacija naučnih doprinosa

У току израде дисертације Марко Маринковић је међународној и домаћој, научној и стручној јавности представио свој рад кроз следеће радове:

#### Категорија M23:

1. Butenweg, C., Marinković, M. Erdbebensicherer Anschluss von Ausfachungsmauerwerk in Stahlbetonrahmentragwerken mit Entkopplungselementen, *Bauingenieur*, Band 93, Nr. 9, 2018. ISSN 0005-6650, Publisher: Springer-VDI-Verlag (прихваћено за штампу за септембарски број 2018 - прва страница рада („препринт“) је дата у прилогу на крају извештаја).

#### Категорија M51:

1. Salatić R., Mandić R., Marinković M., Seizmički proračun zidanih zgrada prema Evrokodu 8, *Izgradnja* 67 (2013) 5-6, p. 221-234, Beograd 2013. ISSN 0350-5421.
2. Salatić R., Mandić R., Marinković M., Metodologija projektovanja nadogradnje zidanih objekata, *Izgradnja* 68 (2014) 5-6, p. 249-256, Beograd 2014. ISSN 0350-5421.
3. C. Butenweg, T. Kubalski, M. Marinkovic, T. Pftzing and E. Fehling. Ausfachungen aus Ziegelmauerwerk, *Mauerwerk Kalender 2016: Baustoffe, Sanierung, Eurocode-Praxis*, Jäger, W. (Hrsg.), Publisher: Verlag Ernst & Sohn, 2016., p. 563-575. ISSN 0170-4958. ISBN 978-3-433-03131-5, DOI: 10.1002/9783433606964.ch15
4. C. Butenweg, M. Marinković, T. Kubalski, S. Klinkel. Masonry infilled reinforced concrete frames under horizontal loading / Stahlbetonrahmen mit Ausfachungen aus Mauerwerk unter horizontalen Belastungen. *Mauerwerk* 20(4):305-312, Avgust 2016. ISSN 1432-3427 DOI: 10.1002/dama.201600703

#### Категорија M33:

1. Mandić R., Salatić R., Perović Z., Marinković M., Experiences in the numerical modelling of masonry infilled frames, Proceedings 4th International Congress of Serbian Society of Mechanics, Vrnjačka Banja, Serbia, June 4-7 2013, p.455-460, ISBN 978-86-909973-5-0
2. Salatić R., Mandić R., Marinković M., Carević V., Modelling of masonry infill using a commercial computer software, Proceedings 10th International Scientific Technical Conference “Contemporary Theory and Practice in Building Development”, Banja Luka, May 15–16 2014., p.129-138, ISBN 978-99955-630-9-7.
3. Salatić R., Mandić R., Marinković M., Carević V., Pushover analysis of RC frames with masonry infill, Proceedings 4th International Conference “Earthquake Engineering and Engineering Seismology”, Borsko jezero, Serbia, May 19–21 2014, 177-186, ISBN 978-86-88897-05-1.
4. Salatić R., Marinković M., Todorović M., Nonlinear Modelling of RC Beam, Proceedings 6th International Conference “Civil engineering - science & practice”, Žabljak, Montenegro, March 7–11. 2016., p.233-240, ISBN 978-86-82707-30-1.
5. Salatić R., Mandić M., Marinković M., Numerička analiza mehanizama loma zidane ispune kod AB ramova, Peto međunarodno naučno-stručno savetovanje “Zemljotresno inženjerstvo i inženjerska seizmologija”, Sremski Karlovci, Srbija, 29-30 Jun 2016, str.337-344. ISBN 978-86-88897-08-2.
6. T. Kubalski, M. Marinković, C. Butenweg, Numerical investigation of masonry infilled R.C. frames, 16th International Brick and Block Masonry Conference, Padova, Italy, June 26–30, 2016, p. 1219-1229. ISBN 9781138029996.
7. T. Kubalski, C. Butenweg, M. Marinković, S. Klinkel, Investigation of the seismic behaviour of infill masonry using numerical modelling approaches, 16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago Chile, January 9-13, 2017, Paper N° 3064.

#### Категорија M34:

1. Marinković M., Nonlinear seismic analysis of RC frame structures with masonry infill, Baku World Forum of Young Scientists 2014, Baku, Azerbaijan, May 26–31 2014., p.18-19.

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

У оквиру докторске дисертације под насловом „Innovative system for seismic resistant masonry infills in reinforced concrete frame structures“ (на српском језику „Иновативни систем за сеизмички отпорну зидану испуну у армиранобетонским рамовским конструкцијама“) предложен је оригиналан систем за побољшање понашања зидане испуне при дејству земљотреса. Резултати експерименталних истраживања која су спроведена од стране кандидата, као и развијени прорачунски концепт, представљају оригиналан научни и стручни допринос у области грађевинарства. Резултати истраживања имају практичну примену, а могу да послуже и као основ за даља научна истраживања у овој области.

Комисија сматра да урађена докторска дисертација кандидата Марка Маринковића, магистарског инжењера грађевинарства, представља вредан и значајан допринос пројектовању и прорачуну армиранобетонских конструкција са зиданом испуном у сеизмичким подручјима. Комисија сматра да дисертација у потпуности испуњава све захтеване критеријуме који се од докторске дисертације очекују, као и да је кандидат испољио способност за самосталан научно-истраживачки рад у свим фазама израде ове дисертације.

Сходно претходном, Комисија предлаже Наставно-научном већу Грађевинског факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под насловом „Innovative system for seismic resistant masonry infills in reinforced concrete frame structures“ (на српском језику „Иновативни систем за сеизмички отпорну зидану испуну у армиранобетонским рамовским конструкцијама“) кандидата Марка Маринковића, магистарског инжењера грађевинарства, изложи на увид јавности, прихвати и упути на коначно усвајање Већу научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду, као и да се након завршетка ове процедуре кандидат позове на усмену одбрану дисертације пред Комисијом у истом саставу.

### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

Београд, 25.07.2018.

.....  
Prof. Dr.-Ing. Christoph Butenweg  
(Center for Wind and Earthquake Engineering, RWTH Aachen University)

.....  
Проф. др Растислав Мандић, дипл.грађ.инж.  
(Грађевински факултет Универзитета у Београду)

.....  
в. проф. др Ратко Салатић, дипл.грађ.инж.  
(Грађевински факултет Универзитета у Београду)

.....  
Dr. Paolo Morandi  
(EUCENTRE, Department of Structures and Infrastructures, Pavia, Italy)

.....  
в. проф. др Зоран Мишковић, дипл.грађ.инж.  
(Грађевински факултет Универзитета у Београду)



# Erdbebensicherer Anschluss von Ausfachungsmauerwerk in Stahlbetonrahmentragwerken mit Entkopplungselementen

C. Butenweg, M. Marinković

**Zusammenfassung** Stahlbetonrahmentragwerke mit Mauerwerksausfachungen weisen nach Erdbebenereignissen häufig schwere Schäden auf, da die Ausfachungen ohne weitere konstruktive Maßnahmen mit vollem Kontakt zum Stahlbetonrahmen eingemauert werden. Durch die unplanmäßige Beteiligung am horizontalen Lastabtrag erfahren die Ausfachungen Belastungen in Wandebene und beeinflussen das globale Schwingungsverhalten der Rahmentragwerke. In Kombination mit den gleichzeitig auftretenden seismischen Trägheitskräften senkrecht zur Wand führt dies in vielen Fällen zu einem Versagen der mit niedrigen Festigkeiten ausgeführten Ausfachungen. Dies war der Anlass in dem europäischen Forschungsprojekt INSYSME ein Entkopplungssystem zu entwickeln, mit dem Rahmen und Ausfachung durch ein spezielles Profil aus Elastomeren entkoppelt werden. Das Profil ermöglicht Relativverschiebungen zwischen Rahmen und Ausfachung und stellt gleichzeitig die Aufnahme von Belastungen senkrecht zur Wand sicher. Der Beitrag erläutert zunächst den Aufbau des Systems und gibt einen Überblick über die in Kleinbauteilversuchen ermittelten Tragfähigkeiten. Zudem werden experimentelle Untersuchungen an mit hochwärmedämmenden Mauerziegeln ausgefachten Stahlbetonrahmen mit und ohne Entkopplungssystem für getrennte und kombinierte Belastungen in und senkrecht zur Wandebene vorgestellt. Auf Grundlage einer Versuchsauswertung und eines Ergebnisvergleichs werden Wirkungsweise und Effektivität des entwickelten Entkopplungssystems demonstriert.

## Earthquake resistant connection for masonry infill walls in reinforced concrete frame structures with decoupling elements

**Abstract** Severe damages of masonry infill walls in reinforced concrete frames have been observed after past earthquakes since they are generally installed without specific constructive measures and in full contact to the surrounding reinforced concrete frame. The rigidly attached infill walls become part of the horizontal load-bearing system and influence the global vibration behaviour of the reinforced concrete frame structures. The combination of in- and out-of-plane loading leads to failure of the infill walls, which are usually designed and executed as low-strength walls. This unacceptable situation was the motivation to start the development of a

decoupling system which separates the frame and the masonry infill by means of specially shaped rubbers placed in between the frame and infill. The rubbers allow relative displacements between the frame and infill and prevent at the same time the out-of-plane failure of the infill wall. The article first introduces the setup of the new decoupling system and provides an overview of the load bearing capacities obtained through small specimen tests on components. Thereafter the results of full scale tests on reinforced concrete frames, filled with highly thermal insulating bricks, are presented for separate and combined in-plane and out-of-plane loading conditions. Finally the functionality and effectiveness of the system is illustrated by means of a comparison of experimental results obtained for frames with and without decoupling elements.

## 1 Einleitung

In modernen Mehrgeschossbauten in Stahlbetonrahmenbauweise werden die Rahmenflächen im Innen- und Außenwandbereich vorzugsweise mit Mauerwerksausfachungen geschlossen, da mit dieser etablierten und robusten Wandbauweise alle normativen Anforderungen hinsichtlich des Schall-, Wärme- und Brandschutzes erfüllt werden. Darüber hinaus können Innenwände entsprechend der architektonischen Anforderungen und Nutzung einfach zurückgebaut oder versetzt werden. In der Regel werden Mauerwerksausfachungen aus nicht-tragendem Mauerwerk ausgeführt und finden als sekundäre Bauteile bei der statischen Auslegung der Gebäude keine Berücksichtigung. Die Ausführung der Ausfachungen erfolgt traditionell mit vollem Kontakt zum Stahlbetonrahmen, wobei die Anschlussfugen entweder mit Mörtel oder schnell aushärtendem Montageschaum verfüllt werden. Diese Ausführung führt im Erdbebenfall insbesondere bei erdbebengerecht ausgelegten Rahmen mit geringer Steifigkeit und hohem Verformungsvermögen zu einer schnellen Aktivierung der deutlich steiferen Ausfachungen. Die Aktivierung führt zu einer ungewollten Interaktion zwischen Rahmen und Ausfachung und in der Folge zu einer unplanmäßigen Beteiligung der Ausfachungen am Lastabtrag. Sind die Ausfachungen im Grund- und Aufriss zudem unregelmäßig angeordnet, können sich daraus hohe Zusatzbeanspruchungen in den Ausfachungen durch Torsionseffekte ergeben. Zusätzlich zu den Belastungen in Wandebene werden die Ausfachungen durch seismische Kräfte senkrecht zur Ebene belastet. Die Belastungen in und senkrecht zur Rahmenebene können in Abhängigkeit von der räumlichen Wirkung der Erdbebenkomponenten unabhängig voneinander oder kombiniert auftreten können. Zurückliegende Erdbeben in Kocaeli (Türkei, 1999), Christchurch (Neuseeland, 2011) und die italienischen Erdbebenereignisse in L'Aquila (2009), Emilia Romagna (2012) sowie Mittelitalien (2016) haben die hohe Schadensanfälligkeit von traditionellen Mauerwerksausfachungen eindrucksvoll gezeigt. Bild 1 zeigt beispielhaft die Schadensbilder von zwei Ausfachungswänden mit Hochlochziegeln verursacht durch die Erdbeben in der Emilia Romagna (2012) und L'Aquila (2009).

Prof. Dr.-Ing. Christoph Butenweg

CWE – Center for Wind and Earthquake Engineering  
RWTH-Aachen University  
Mies-van-der Rohe-Straße 1, 52074 Aachen  
butenweg@bb.rwth-aachen.de  
Tel. 0241 8025869, Fax 0241 8022303

Marko Marinković, M.Sc.

Department of engineering mechanics and theory of structures  
University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering  
Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Belgrade, Serbia  
mmarinkovic@grf.bg.ac.rs  
Tel. +381 011 3218-580, Fax +381 011 3370-223