

Savjetovanje 7: Obnova Zagreba nakon potresa  
Zagrebu od Osijeka

# Tradicijske zemljane kuće u potresno aktivnim područjima

Doc. dr. sc. Ivan Kraus

[ikraus@gfos.hr](mailto:ikraus@gfos.hr)

Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek  
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

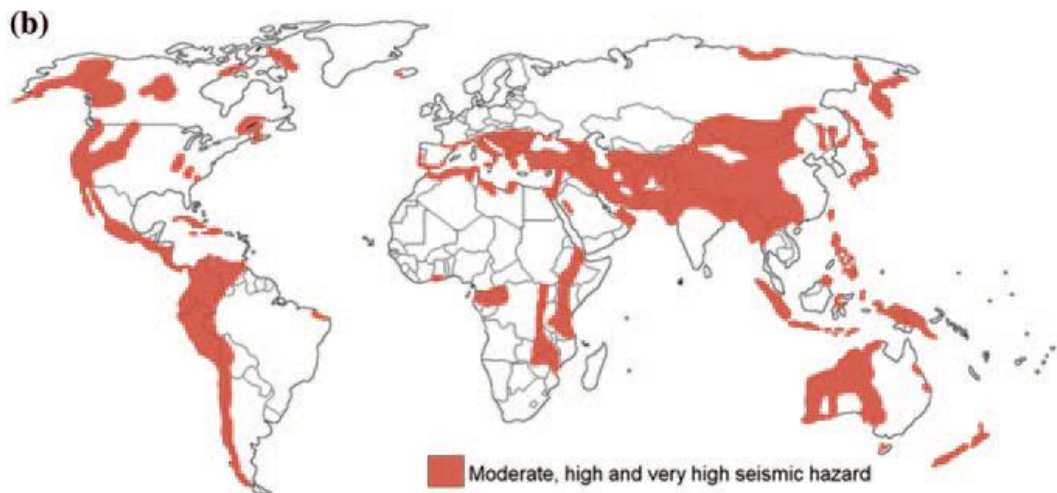
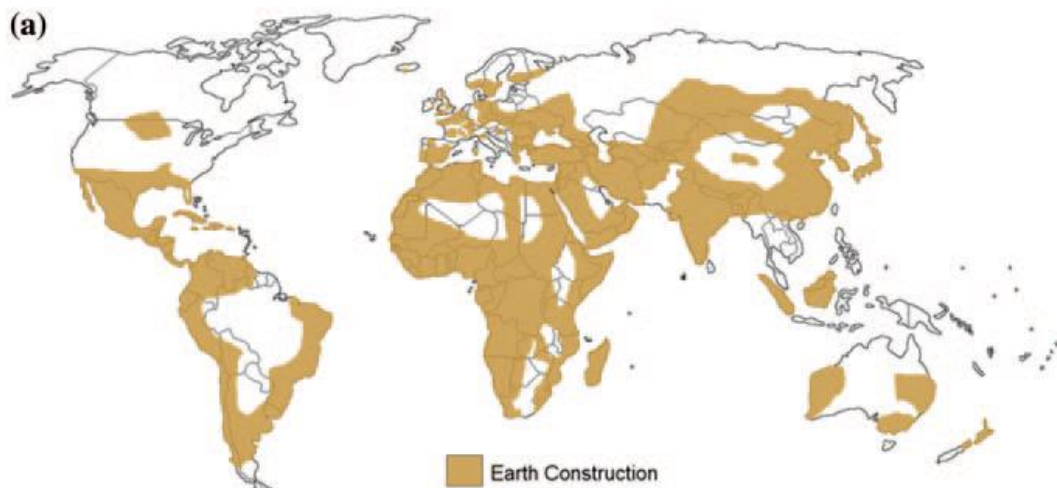
22. 2. 2021.

# Sadržaj

- 1 Zemljana arhitektura u potresno aktivnim područjima
  - 2 Rezultati eksperimentalnih ispitivanja
  - 3 Potresna područja Republike Hrvatske
  - 4 Zemljana arhitektura u Hrvatskoj
  - 5 Aktualne norme, mogućnosti i Strategija
  - 6 Numeričke simulacije primjenom programa ANSYS
  - 7 Umjesto zaključka
- Korištena literatura



# Zemljana arhitektura u potresno aktivnim područjima



(Silva i sur., 2014.)

Zemljane građevine je moguće pronaći u nerazvijenim zemljama trećeg svijeta, ali i u visoko razvijenim zemljama.

Rješavaju pitanje stanovanja za preko 30 % svjetske populacije.

Pojavljuju se često na lokacijama s izraženom potresnom aktivnošću (npr. Japan, Kalifornija, Italija, Balkanski poluotok).

# Zemljana arhitektura u potresno aktivnim područjima



(Wang i sur., 2017.)

Karakteristična oštećenja u postojećim građevinama od nabijene zemlje:

- a) potpuni slom konstrukcije,
- b) ispadanje zabatnog zida,
- c) ispadanje uzdužnog zida,
- d) vertikalne pukotine u blizini uglova
- e) vertikalne pukotine koje nastaju na mjestima unosa opterećenja

# Zemljana arhitektura u potresno aktivnim područjima

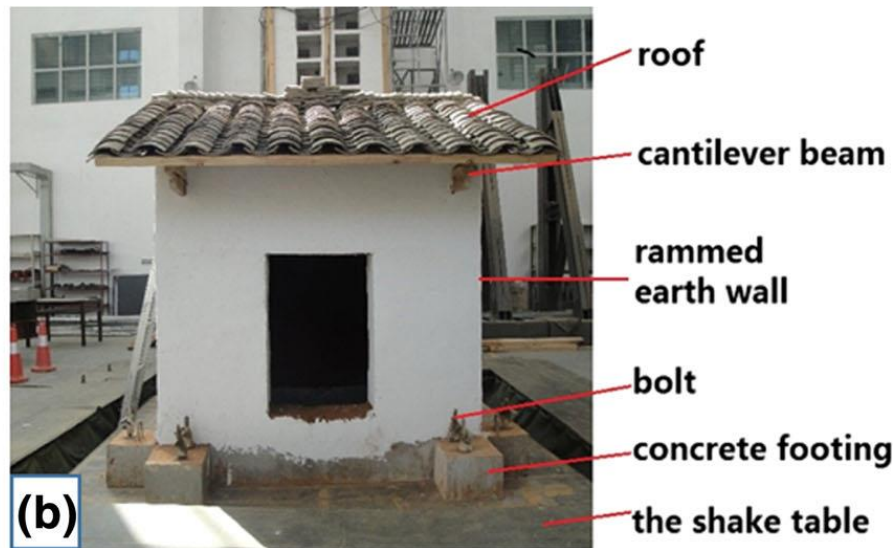
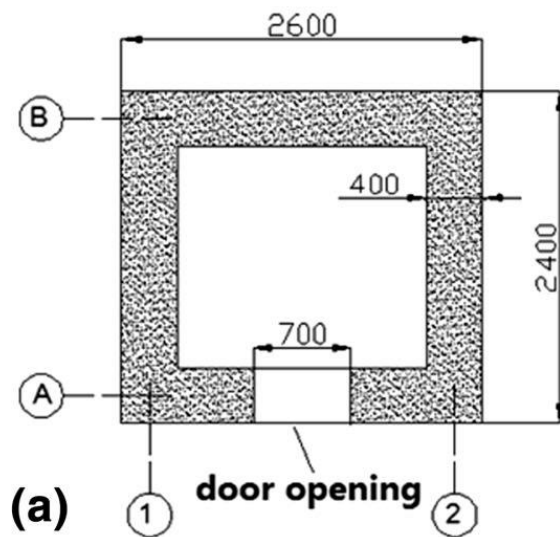
Zemljin Kriptonit, u pogledu građevinskog materijala za nosive zidove u potresnim područjima, su njena relativno velika masa, mala krutost i niska čvrstoća.

Nabijena zemlja ima gotovo 20 puta manju čvrstoću od betona ili opeke.

# Rezultati eksperimentalnih ispitivanja (1)

Model je ispitan radi uvida u potresno ponašanje i moguće oblike sloma.

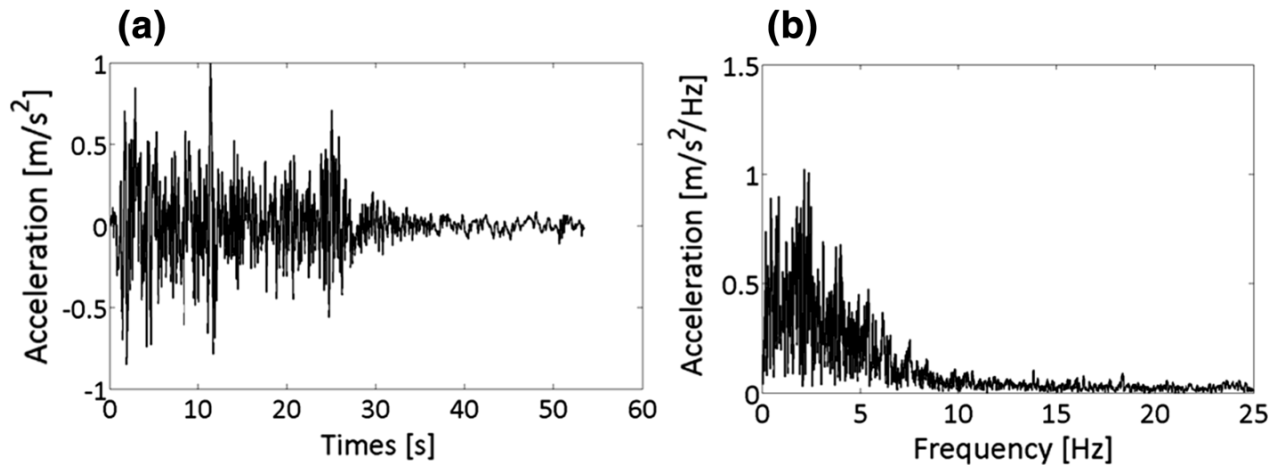
Model kuće je pobuđivan simuliranim potresnim opterećenjem uz postupno povećanje intenziteta (0,1 g, 0,22 g, 0,4 g te 0,51 g)



(Wang i sur., 2017.)

# Rezultati eksperimentalnih ispitivanja (1)

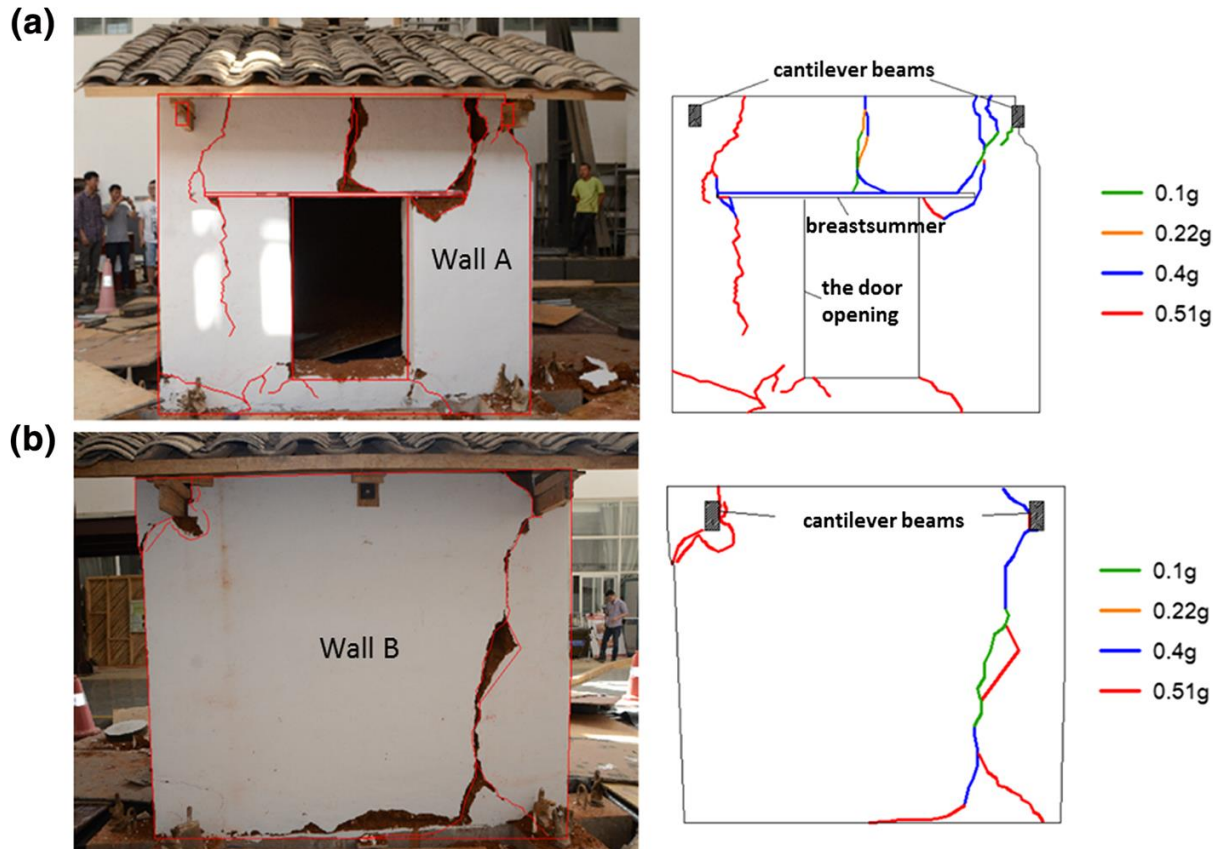
Horizontalno opterećenje je simulirano primjenom potresne platforme i zapisa El Centro 1940.



(Wang i sur., 2017.)

Bijelim šumom se model pobuđivao istovremeno u X i Y smjeru. Simuliranim zapisom potresa model je uvijek prvo pobuđen u X smjeru pa potom u Y smjeru.

# Rezultati eksperimentalnih ispitivanja (1)



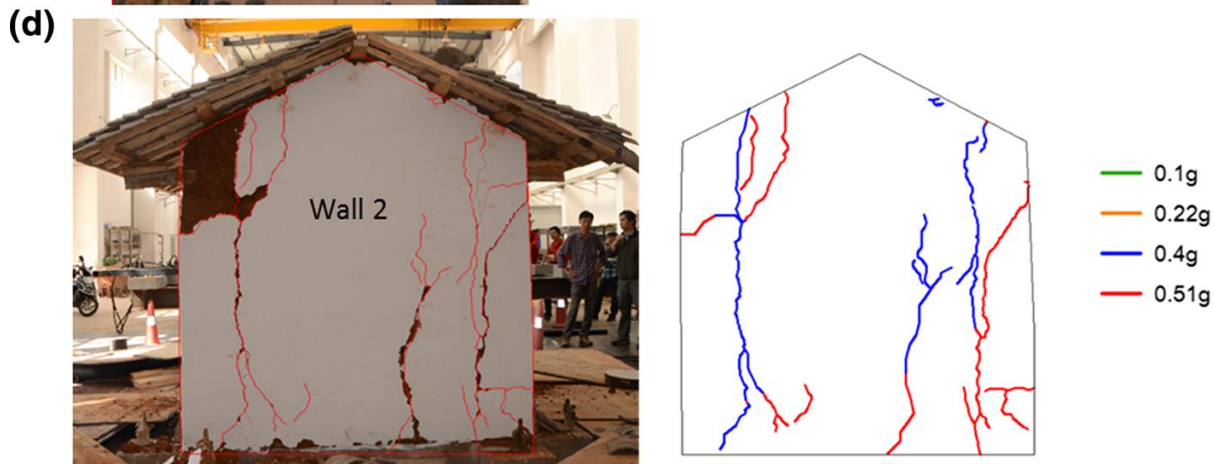
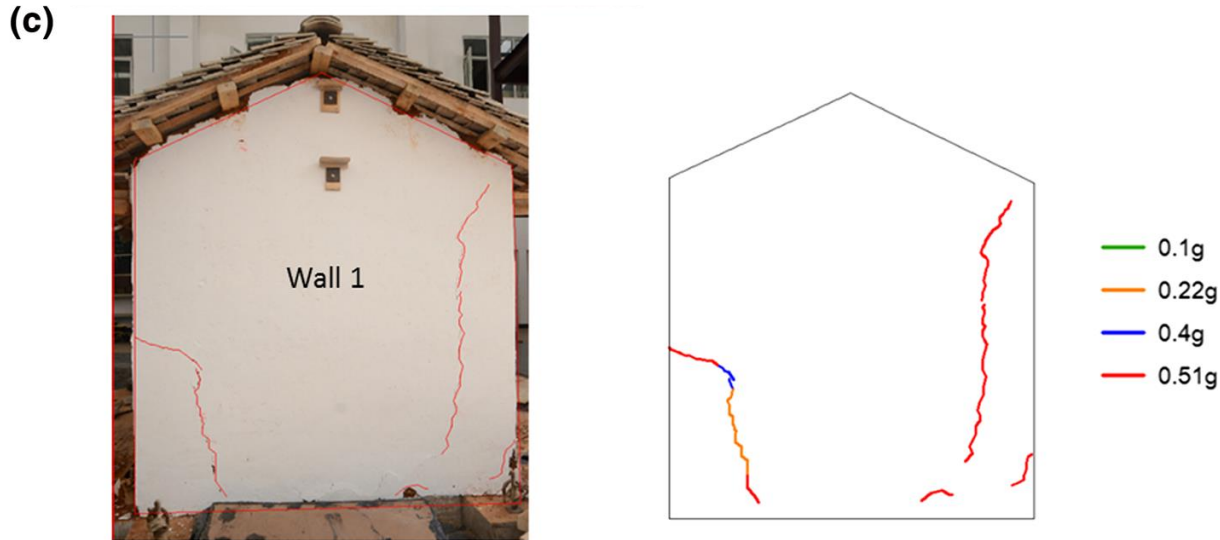
(Wang i sur., 2017.)

Oštećenje modela je uočeno već pri ubrzanju platforme od 0,1 g i to pri djelovanju potresa u smjeru okomito na zidove (en. *wall*) A i B

Prve pukotine su se pojavile iznad drvenog nadvoja, što se pripisuje širenju ranijih pukotina nastalih prilikom sušenja



# Rezultati eksperimentalnih ispitivanja (1)



(Wang i sur., 2017.)

Pri djelovanju simuliranog potresa s najvećim ubrzanjem od 0,51 g javljaju se izražene vertikalne pukotine, veći segmenti zida se odvajaju i padaju na platformu.

# Rezultati eksperimentalnih ispitivanja (1)

Osnovni period vibriranja modela kuće je određen primjenom bijelog šuma.

Faza ispitivanja	$f$ (Hz)	$T$ (s)	$\xi$ (%)
Prije pobude zapisom El Centro 1940	8,79	0,114	9,81
Nakon pobude s $a_{g\max} = 0,10$ g	8,79	0,114	9,81
Nakon pobude s $a_{g\max} = 0,22$ g	7,32	0,137	10,95
Nakon pobude s $a_{g\max} = 0,40$ g	4,88	0,205	12,92
Nakon pobude s $a_{g\max} = 0,51$ g	N/A	N/A	13,56

Povećanje perioda i prigušenja je uzrokovano progresivnim razvojem pukotina i posljedičnim smanjenjem krutosti.

Prigušenje određeno na neoštećenom modelu (elastično područje):

9,81 %

# Rezultati eksperimentalnih ispitivanja (1)

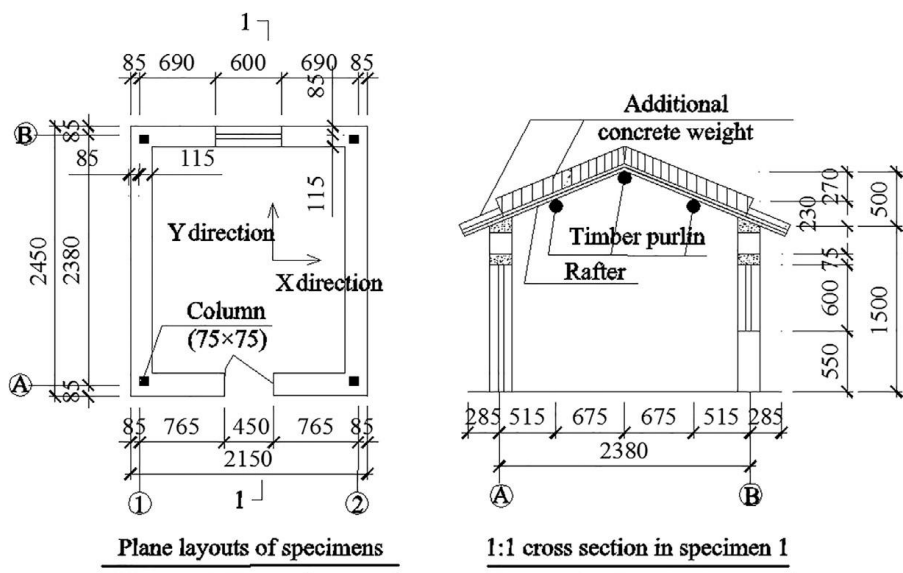
Procjena potresne otpornosti modela kuće ispitane na potesnom stolu je napravljena u skladu s *Potresnim tehničkim specifikacijama za građenje konstrukcija u gradovima i naseljima\**, koje izdaje Ministarstvo stanovanja i urbano-ruralnog razvoja Narodne Republike Kine:

*\*JGJ161 (2008) Seismic technical specification for building construction in town and village, Issued by Ministry of housing and urban–rural development of the People’s Republic of China*

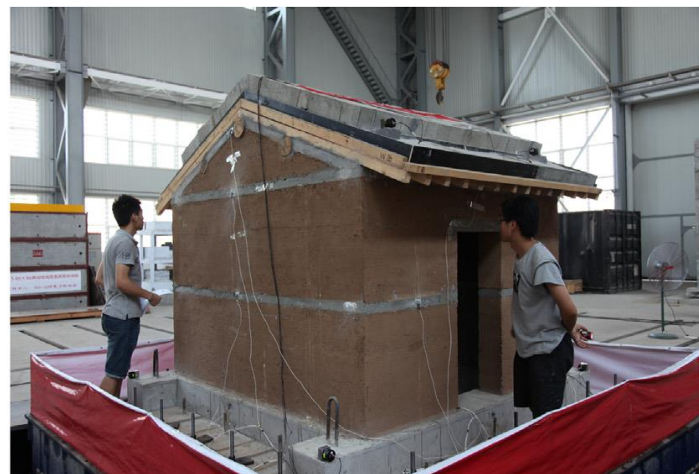
## Rezultati eksperimentalnih ispitivanja (2)

Model tradicijske zemljane kuće (mjerilo 1:2) ispitan na potresnom stolu.

Ispitivanje je provedeno u laboratoriju Sveučilište za arhitekturu i tehnologiju u Xi'an, Narodna republika Kina.



(Zhou i Liu, 2019.)

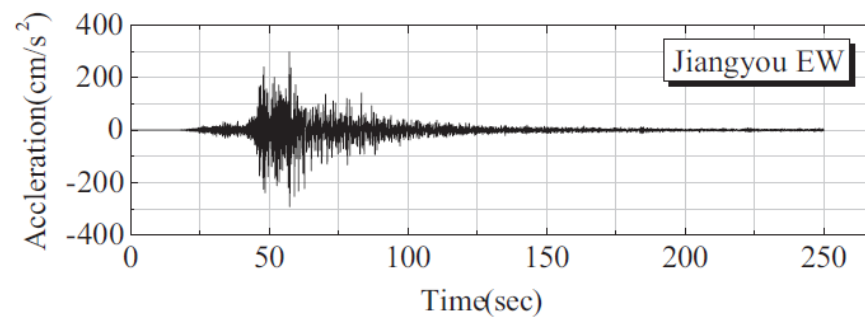
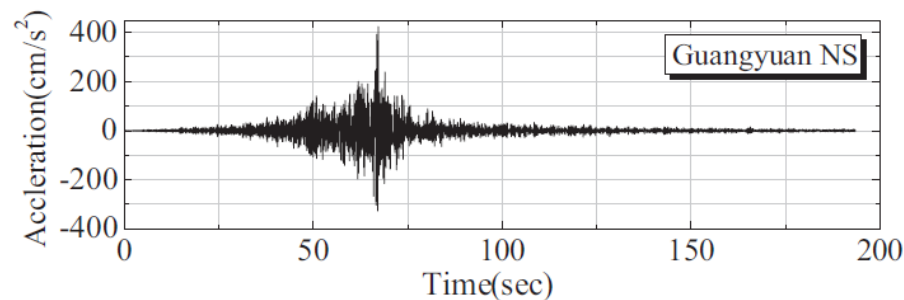
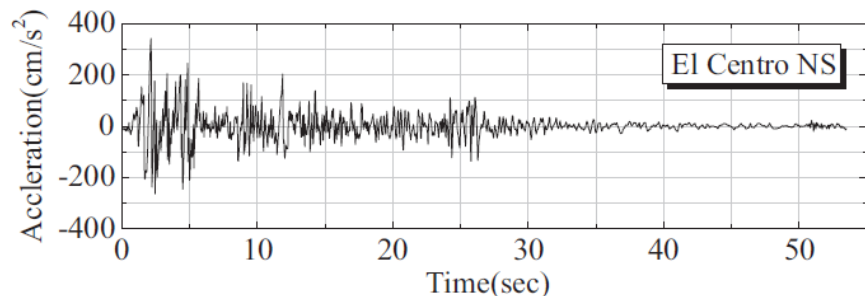


(Zhou i Liu, 2019.)

## Rezultati eksperimentalnih ispitivanja (2)

Model kuće je pobuđivan simuliranim potresnim opterećenjem uz postupno povećanje intenziteta (0,05 g, 0,1 g, 0,2 g, 0,3 g te 0,4 g, 0,55 g te 0,7 g).

Korištena su tri različita zapisa potresa.



(Zhou i Liu, 2019.)

## Rezultati eksperimentalnih ispitivanja (2)

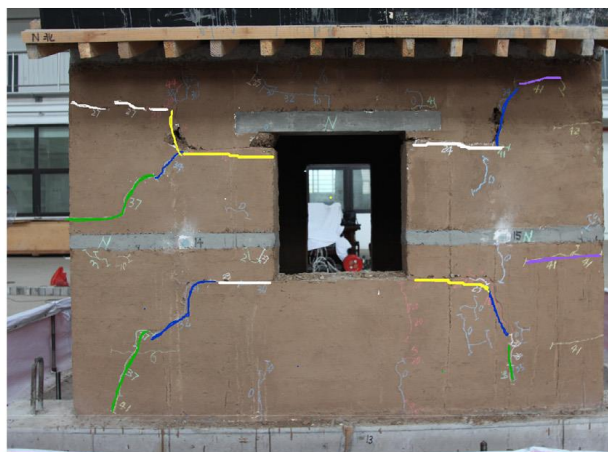
Osnovni period vibriranja modela kuće je određen primjenom bijelog šuma.

Smjer	$f$ (Hz)	$T$ (s)
X	10,74	0,093
Y	17,77	0,056

S povećanjem ubrzanja oštećenje modela je izraženije.

Najizraženiji pad krutosti je uočen pri djelovanju potresa s ubrzanjem od 0,2 g, pri čemu je krutost modela smanjena za oko 25 %.

## Rezultati eksperimentalnih ispitivanja (2)



Pri 0,05 g pojava mikropukotina.

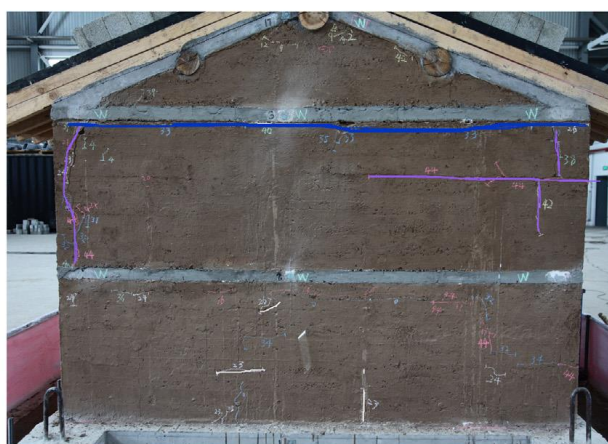
Pri 0,1 g horizontalne pukotine oko otvora.

Pri 0,2 g pojava mikropukotina na donjem rubu zabatnog zida

Pri 0,3 pojava vertikalnih pukotina.

Pri 0,4 g širina pukotina oko otvora iznosi 1,5 mm.

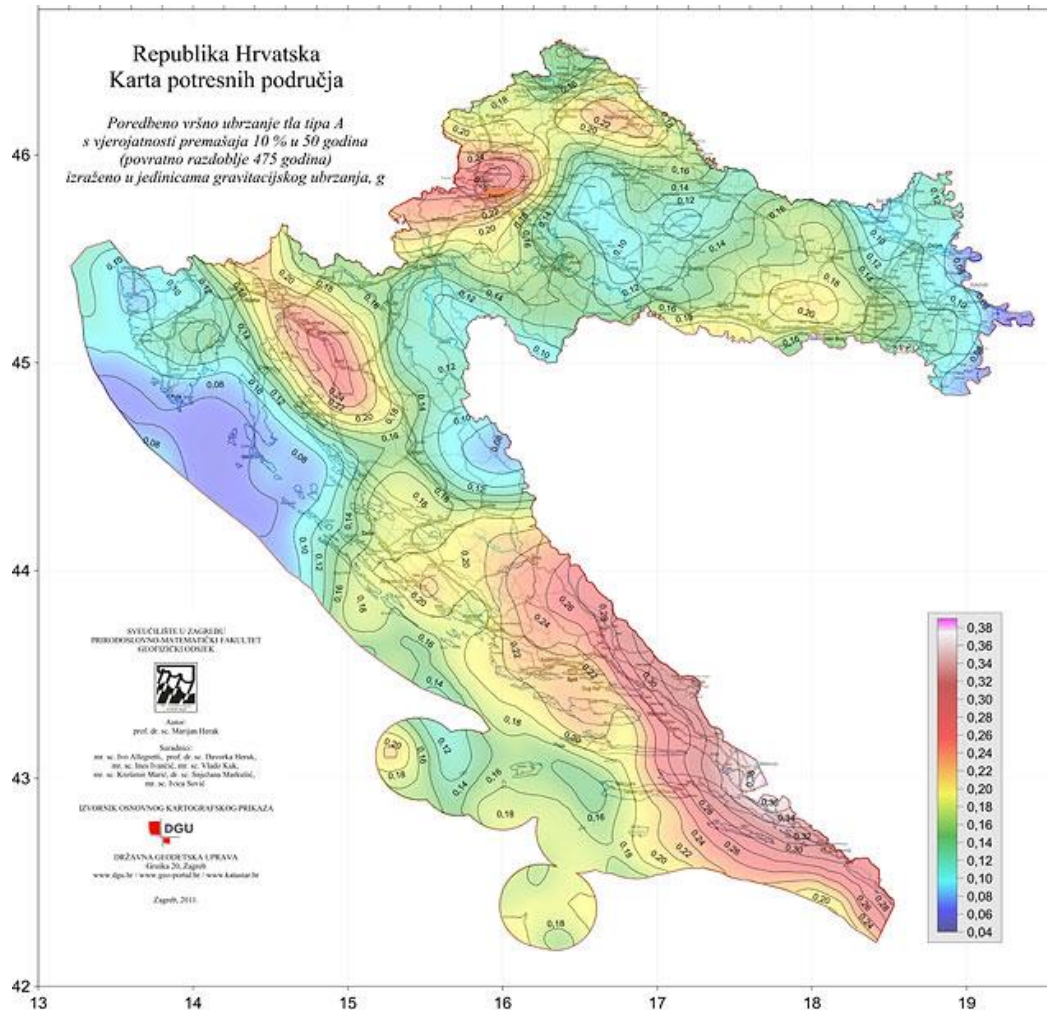
Pri većim ubrzanjima izraženiji razvoj i širenje pukotina.



--- 0,05 g --- 0,1 g --- 0,2 g --- 0,3 g --- 0,4 g --- 0,55 g --- 0,7 g

(Zhou i Liu, 2019.)

# Potresna područja Republike Hrvatske



Karte potresnih područja Republike Hrvatske  
(<http://seizkarta.gfz.hr/karta.php>)

Karte s tumačem (Dodatak C) su sastavni dio Nacionalnog dodatka za niz normi HRN EN 1998 (Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija).

Zemljana arhitektura je česta na lokacijama s očekivanim horizontalnim vršnim ubrzanjem temeljnog tla između 0,08 i 0,20 g (u kontekstu povratnog razdoblja od 475 godina).



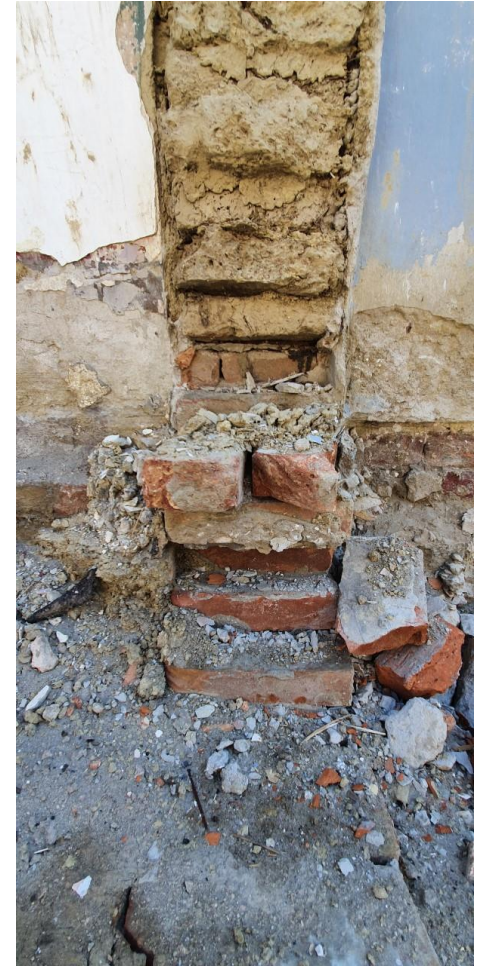
# Zemljana arhitektura u Hrvatskoj

Unutarnji zid kuće u centru Osijeka (Ul. Ivana Gundulića).

Zid debljine približno 25 cm.



(autorska fotografija)



(autorska fotografija)

# Zemljana arhitektura u Hrvatskoj

Pročelje izrađeno od nepečene opeke (Lug/Laskó, Bilje)



(autorska fotografija)



(autorska fotografija)

# Zemljana arhitektura u Hrvatskoj

Vanjski zid gospodarske građevine u Aljmašu (Rudina Balinac).

Gornja polovica zida je izrađena od nabijene zemlje. Donja polovica zida je izrađena od opeke.



(autorska fotografija)



(autorska fotografija)

# Zemljana arhitektura u Hrvatskoj

Stropna konstrukcija i pročelje kuće u naselju

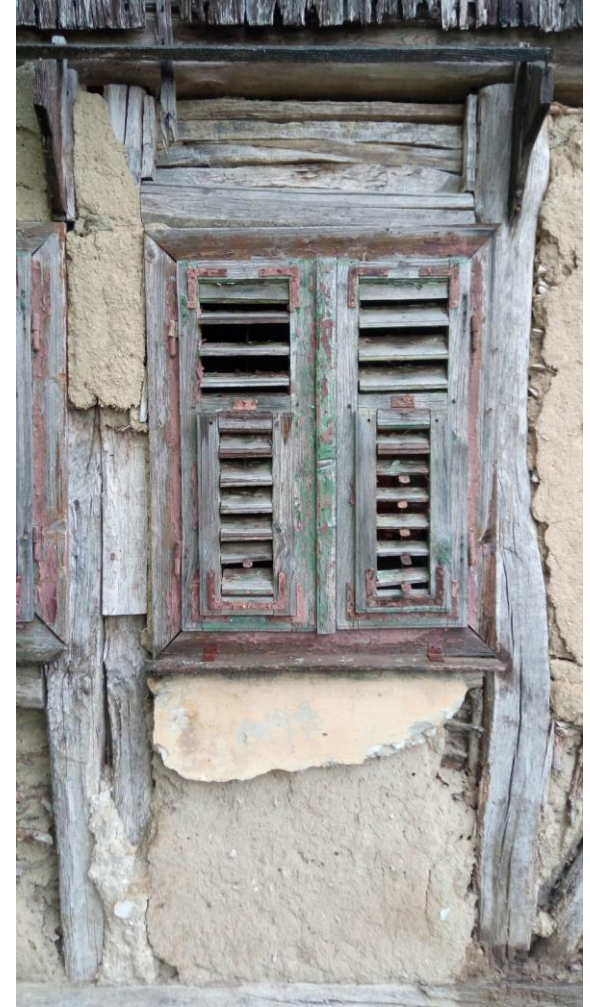
Dopsin, dan prije rušenja.



(autorska fotografija)



(autorska fotografija)



(autorska fotografija)

# Zemljana arhitektura u Hrvatskoj

Osnovni konstrukcijski sustavi:

Zidovi od ćerpiča (nepečene opeke).

Kanatne (skeletne, bondručne) konstrukcije

**Konstrukcije od nabijene zemlje**

Ispun kanatnih zidova:

Pleter od pruća obložen zemljom

Ispun od ćerpiča

Ispun od nabijene zemlje



(autorska fotografija)



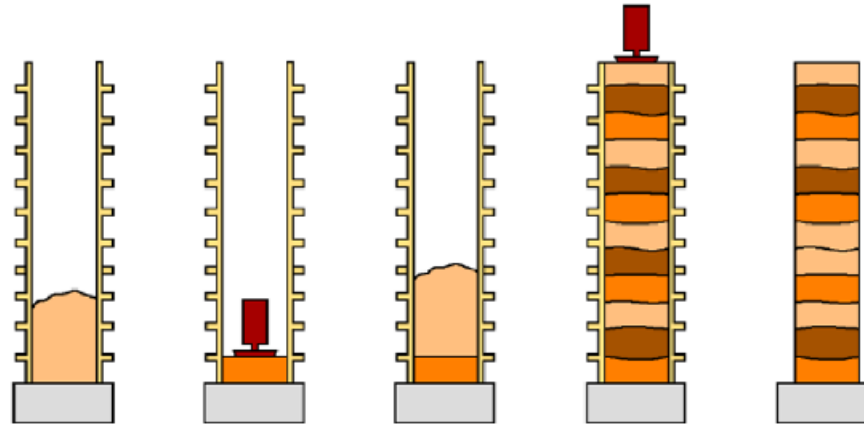
(autorska fotografija)

# Zemljana arhitektura u Hrvatskoj

## Konstrukcije od nabijene zemlje

Smjesa se ugrađivala u segmentima debljine 10 - 15 cm, pri čemu se svaki novi segment ugrađivao nakon sušenja prethodnog segmenta (Lončar-Vicković i Stober, 2011).

Zid se izrađuje nabijanjem sloja zemlje nasutog u oplatu izrađenu od drveta ili metala, ručnim ili, u današnje vrijeme češće, pneumatskim nabijačima.

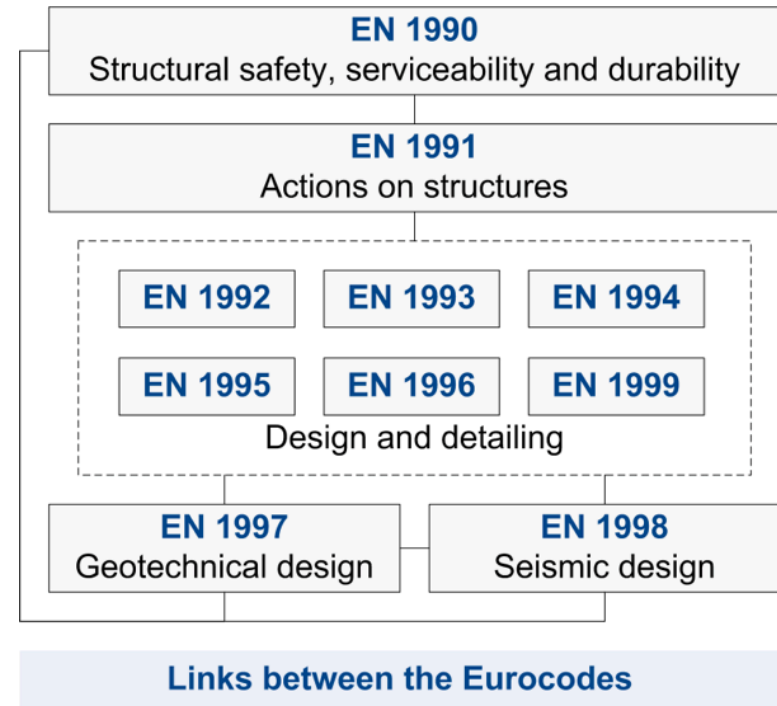


(Perić, 2020)

# Aktualne norme, mogućnosti i Strategija

Budući da je Hrvatska smještena u području s izraženom potresnom aktivnošću, projektiranje i sanacija konstrukcija građevina mora se provoditi u skladu s nizom normi HRN EN 1998.

**No, ove norme ne prepoznaju konstrukcijske elemente građevina izrađene od nabijene zemlje.**



<http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu>

**SAD, Australija i Novi Zeland** imaju norme i/ili preporuke za građenja kuća od zemlje, koje su u skladu s drugim važećim nacionalnim normama (Silva i sur., 2014; Tripura i Singh, 2015).

U nedostatku normi za projektiranje zemljanih kuća, koriste se **norme za zidane konstrukcije** (Tripura i Singh, 2015).

# Aktualne norme, mogućnosti i Strategija

Strategija zaštite, očuvanja i održivog gospodarskog korištenja kulturne baštine Republike Hrvatske, koju je dalo izraditi Ministarstvo kulture Republike Hrvatske, **stavlja graditeljsku baštinu u važan dio kulturnog fonda, a njenu zaštitu i očuvanje obaveznima prema zakonskim odredbama.**

Kao neke od **problema** vezanih za graditeljsku baštinu Strategija navodi:

- i) nedovoljni **stručni kapacitet** za izradu konzervatorskih studija i podloga;
- ii) nedovoljno razrađenu **metodologiju** i postupke za izradu konzervatorske i tehničke dokumentacije za obnovu te
- iii) skromnu **promociju** vrijednosti kulturne baštine.



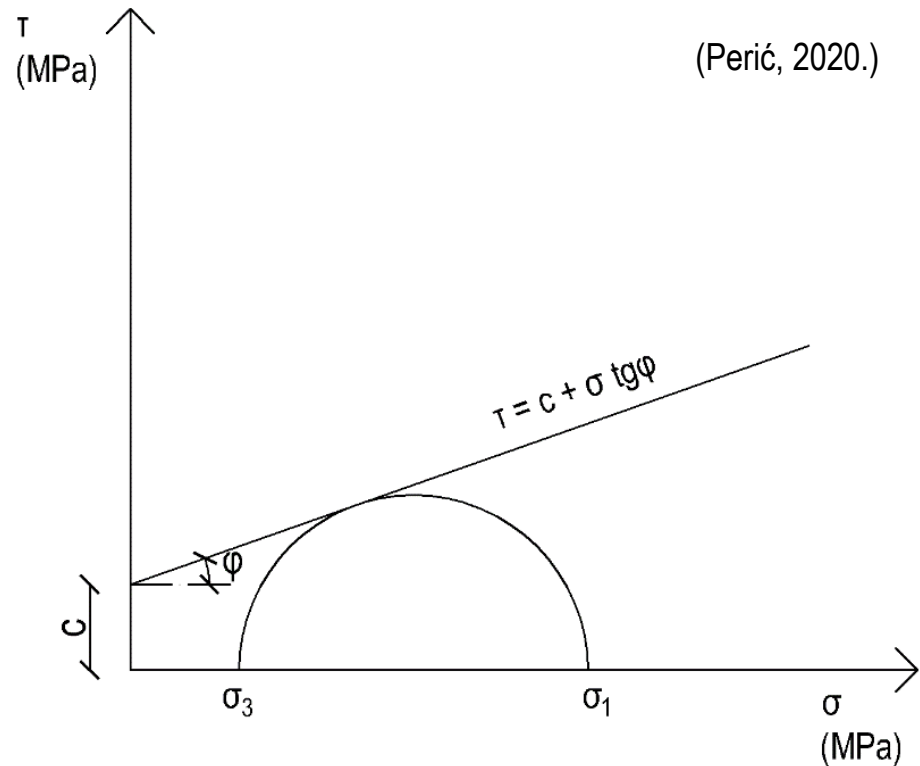
# Numeričke simulacije primjenom programa ANSYS

Ponašanje materijala je definirano primjenom Mohr-Coulombovog modela.

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

gdje je:

- $\tau$  posmična čvrstoća
- $c$  kohezija
- $\sigma$  normalno naprezanje
- $\varphi$  kut unutarnjeg trenja



Čvrstoća tla definirana pomoću dva parametara, kohezije i kuta unutarnjeg trenja tla, koji ovise o vrsti materijala, mineraloškom i granulometrijskom sastavu te omjeru pora.

# Numeričke simulacije primjenom programa ANSYS

Izvor	w (%)	d (kg/m <sup>3</sup> )	E (MPa)	v (-)	f <sub>c</sub> (MPa)	f <sub>t</sub> (MPa)	f <sub>s</sub> (MPa)	c (MPa)	φ (°)
Bui i sur., 2014.	-	1920	500	0,22	1,22	0,122	0,18	0,1708	51
					1,9				
					1,3				
Bui i sur., 2009.	-	1950	470	0,15	1	0,0325	-	-	-
	-	1980	465						
	2,5	1950	470						
	4	1980	460						
	7	2030	440						
Bui, Limam i Bui, 2018.	-	2000	470	0,22	1,9	-	-	-	-
Bui i sur, 2019.	-	2300	400	0,22	2	0,13	-	0,033	30
								0,26	45
Silva i sur., 2014.	-	-	1034	0,27	1,26	0,126	0,15	-	-
Miccoli, Drougkas i Müller, 2016.		2190	4143	0,27	3,73	-	0,7	-	-
Bui i sur., 2016.	-	1950	470	0,22	1	0,1	-	0,1	45
			500	-	1,3	0,13		0,13	-
Bui, Bui i Limam, 2016.	-	2000	470	0,22	1,9	1,33	-	1,33	45
Bui i sur., 2014.	-	-	520	-	0,8	-	-	-	-
	2		950	0,22	2				
	4		950	0,23	2				
	5		925	0,25	1,8				
	6		900	0,26	1,7				
	7		800	0,3	1,3				
	8		700	0,3	1,3				
	9		500	0,35	0,75				
	10		425	0,37	0,55				
	11		400	0,38	0,45				
	Gomes, Lopes i De Brito, 2011.			1900	200				
El-Nabouch i sur., 2018.	2,5	-	-	-	1,1	-	-	0,0309	37,3
Srednja vrijednost:	6	2021	732	0,27	1,42	0,26	0,28	0,29	43
Najmanja vrijednost:	2	1900	200	0,15	0,45	0,03	0,08	0,03	30
Najveća vrijednost:	11	2300	4143	0,38	3,73	1,33	0,7	1,33	51

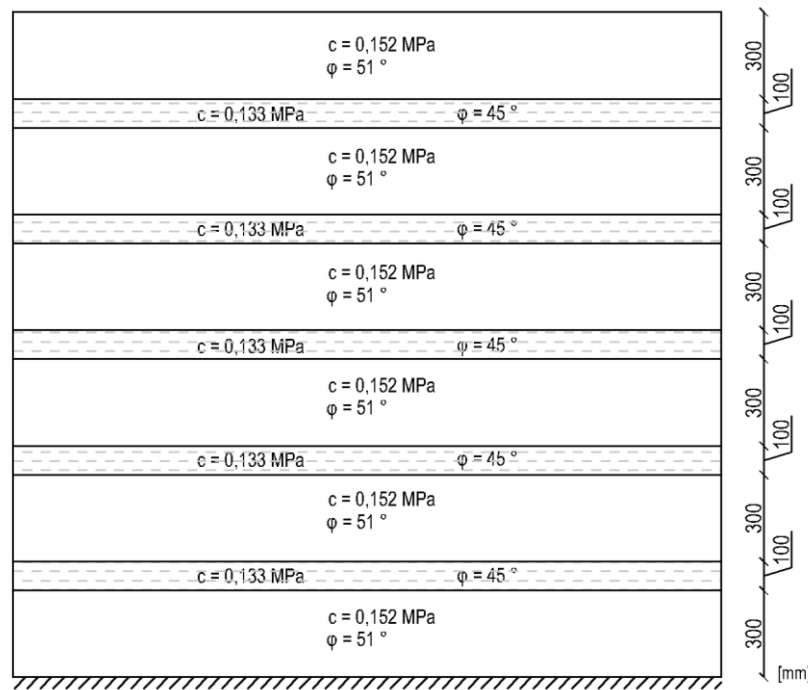
(Perić, 2020.)

# Numeričke simulacije primjenom programa ANSYS

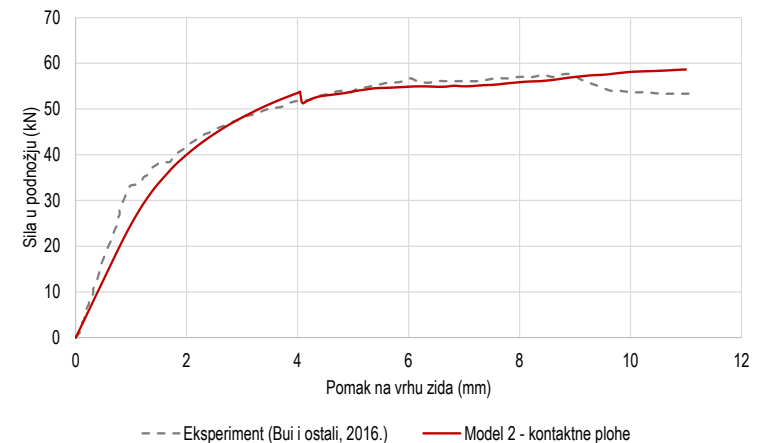
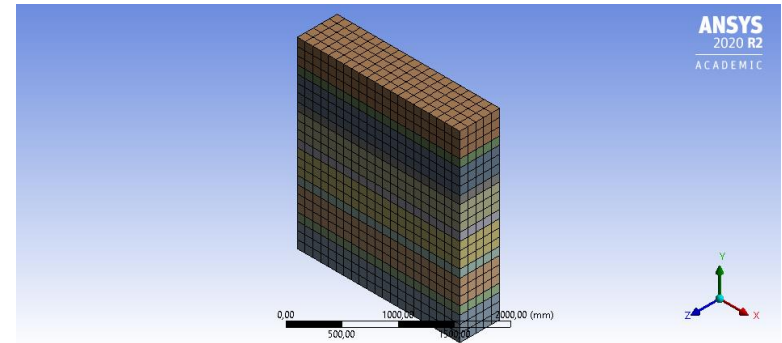
## model 1: zid 50 x 2450 x 2300 cm (Perić, 2020)

Monotno rastuće opterećenje.

Primjena metode postupnog guranja.



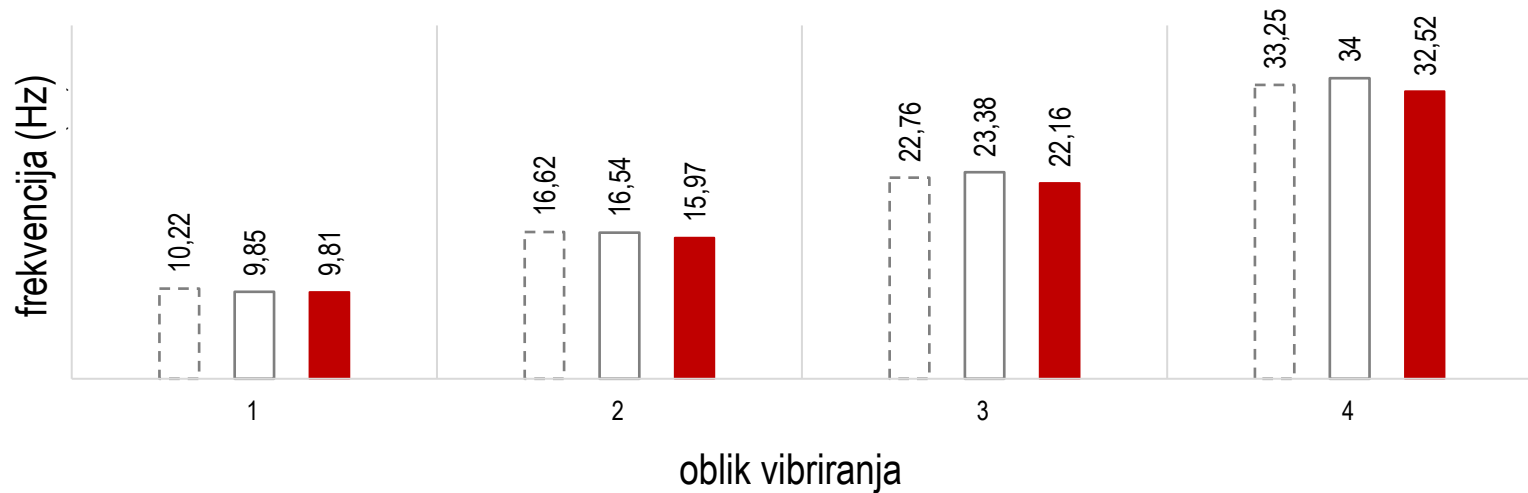
Slojevi nabijene zemlje i kontaktne plohe



Usporedba ponašanja numeričkog modela i eksperimentalno ispitivanog modela

# Numeričke simulacije primjenom programa ANSYS

## model 1: zid 50 x 2450 x 2300 cm (Perić, 2020)



▨ procjena prema Bui i sur., 2009.

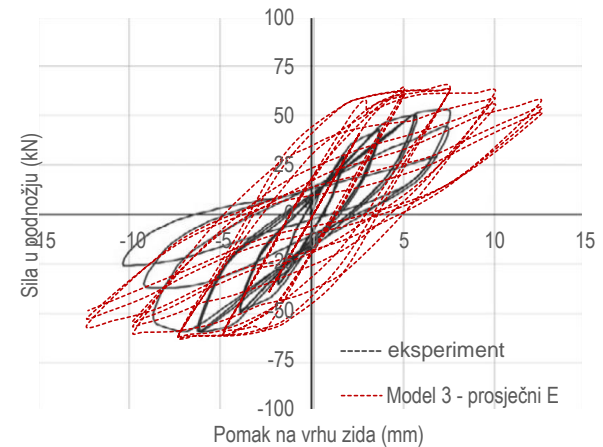
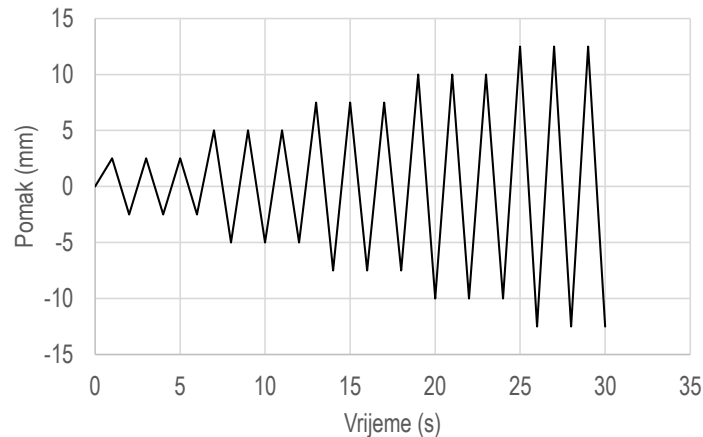
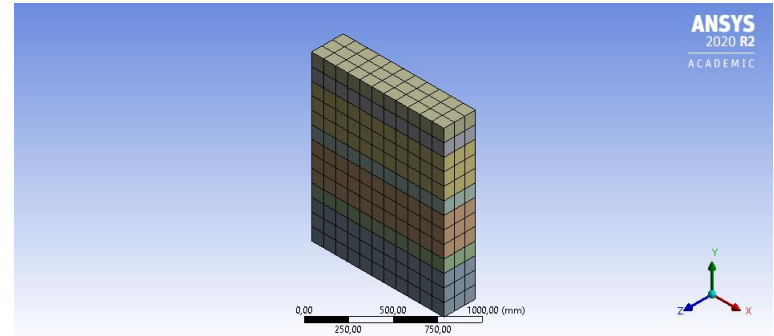
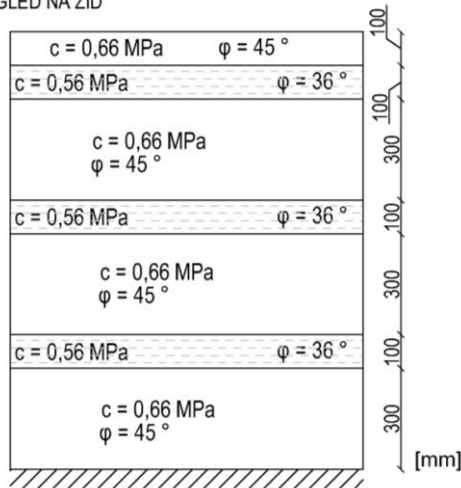
□ mjereno, prema Bui i sur., 2009.

■ numerički model, Perić, 2020.

# Numeričke simulacije primjenom programa ANSYS

## model 2: zid 25 x 1050 x 1300 cm (Perić, 2020)

POGLED NA ZID

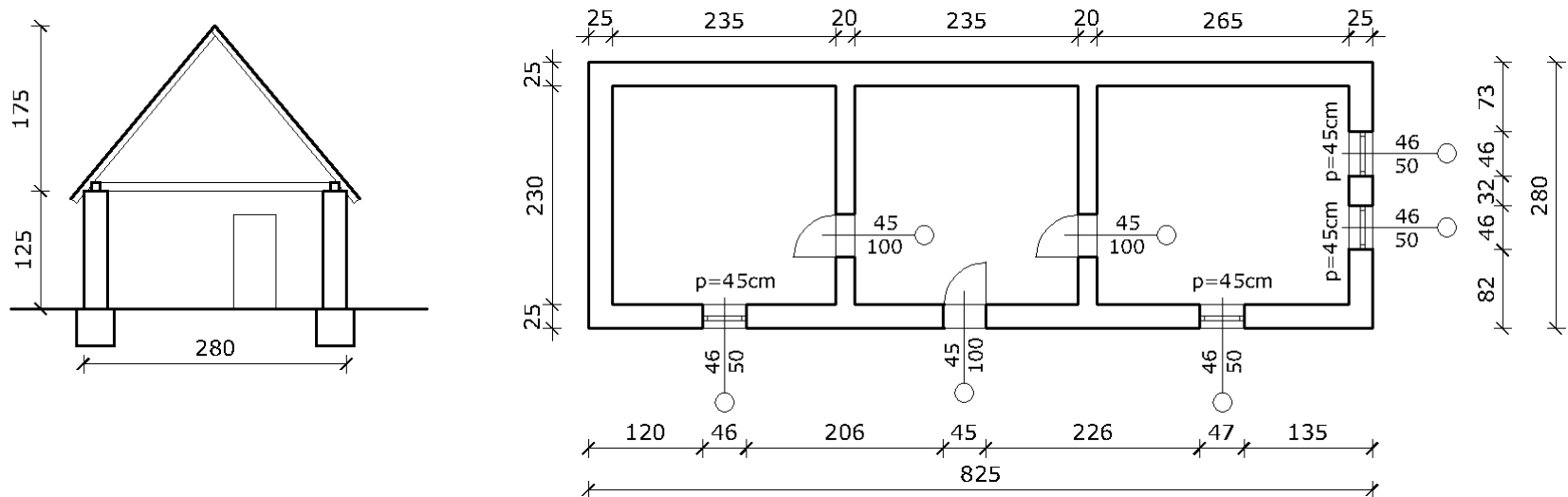


Usporedba ponašanja numeričkog modela i eksperimentalno ispitanog modela

# Umjesto zaključka

Rezultati istraživanja provedenih na tradicijskoj zemljanoj kući Slavonije i Baranje bit će predstavljeni na 1st Croatian Conference on Earthquake Engineering (1CroCEE)

22.-24. ožujka 2021. godine.



# Korištena literatura (1/2)

ANSYS Inc. (2019) „ANSYS Academic Research Mechanical, Release 2019 R3, Help System, Coupled Field Analysis Guide“

Bui, Q.-B. i sur. (2019) „Assessing the seismic behavior of Rammed earth walls with an L-Form cross-section“, Sustainability (Switzerland), 11(5). doi: 10.3390/su11051296

Bui, Q.-B. i sur. (2009) „Compression behaviour of non-industrial materials in civil engineering by three scale experiments: The case of rammed earth“, Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 42(8), str. 1101–1116. doi: 10.1617/s11527-008-9446-y.

Bui, T.-T. i sur. (2016) „Modeling rammed earth wall using discrete element method“, Continuum Mechanics and Thermodynamics, 28(1–2), str. 523–538. doi: 10.1007/s00161-015-0460-3.

El-Nabouch, R. i sur. (2017) „Assessing the in-plane seismic performance of rammed earth walls by using horizontal loading tests“, Engineering Structures. Elsevier Ltd, 145, str. 153–161. doi: 10.1016/j.engstruct.2017.05.027.

Lončar-Vicković, S. i Stober, D. (2011) „Tradicijska kuća Slavonije i Baranje“. Ministarstvo turzima Republike Hrvatske; Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, str. 1–116.

Miccoli, L., Drougkas, A., Mueller, U. (2016). In-plane behaviour of rammed earth under cyclic loading: Experimental testing and finite element modelling. Engineering Structures. 125. 144–152. 10.1016/j.engstruct.2016.07.010.

Perić, A. (2020) 'Potresno ponašanje zidova tradicijskih kuća o nabijene zemlje', diplomski rad, diplomski, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Osijek.

## Korištena literatura (2/2)

Silva R.A., Jaquin P., Oliveira D.V., Miranda T.F., Schueremans L., Cristelo N. (2014) Conservation and New Construction Solutions in Rammed Earth. In: Costa A., Guedes J., Varum H. (eds) Structural Rehabilitation of Old Buildings. Building Pathology and Rehabilitation, vol 2. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-39686-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-39686-1_3)

Tripura, D. D. and Singh, K. D. (2015) 'Axial load-capacity of rectangular cement stabilized rammed earth column', Engineering Structures, 99, pp. 402–412. doi: 10.1016/j.engstruct.2015.05.014.

Wang, Y., Wang, M., Liu, K. et al. Shaking table tests on seismic retrofitting of rammed-earth structures. Bull Earthquake Eng 15, 1037–1055 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10518-016-9996-2>

Zhou, T., Liu, B. (2019). Experimental study on the shaking table tests of a modern inner-reinforced rammed earth structure. Construction and Building Materials. 203. 567-578. 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.070



# Pitanja?

Doc. dr. sc. Ivan Kraus

[ikraus@gfos.hr](mailto:ikraus@gfos.hr)



Ovaj webinar je rezultat aktivnosti provedenih u okviru projekta „Nabijena zemlja za modeliranje i normizaciju u potresno aktivnim područjima” (UIP-2020-02-7363), koji sufinancira Hrvatska zaklada za znanost.