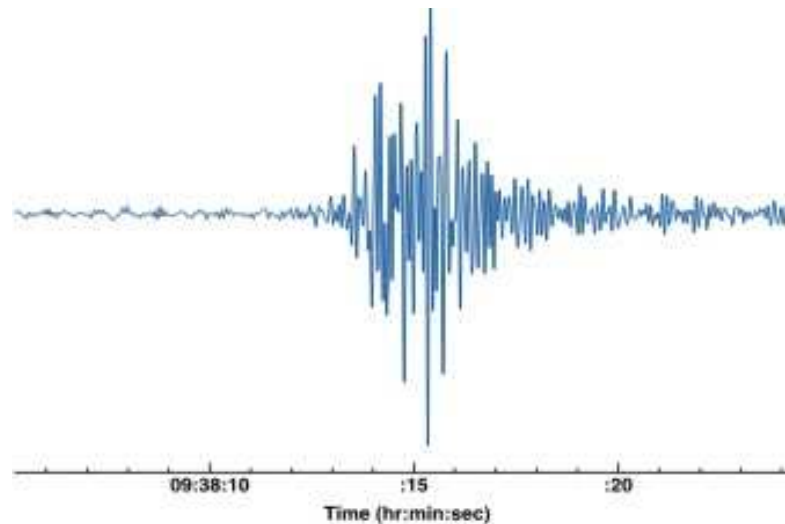




Univerzitet u Nišu
Građevinsko-arhitektonski fakultet



Vibracije kao relevantno stanje upotrebljivosti konstrukcija



Uvod

- trendovi u projektovanju savremenih konstrukcija, uključujući i pešačke mostove:



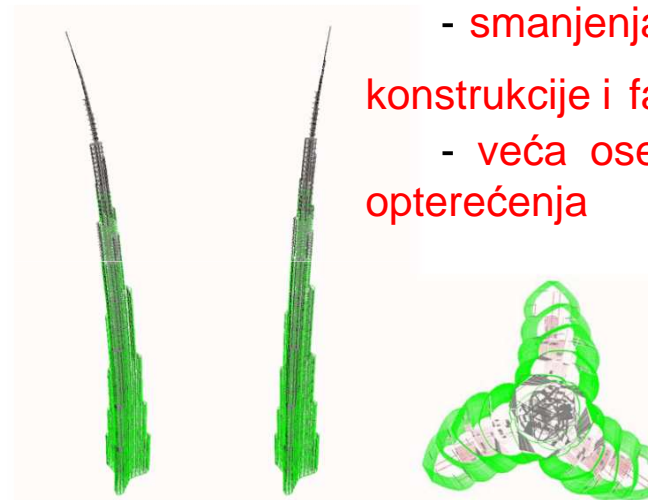
Pešački most preko reke Nišave u Nišu (2003)

- vitkije i laganije konstrukcije većih raspona
- povećana brzina gradnje
- lake međuspratne konstrukcije sa velikim otvorenim prostorima
- potencijalno promenljive namene, kod objekata visokogradnje



Burj Kalifa , UAE (2003)

- razvoj građevinskih materijala, primena savremenih tehnologija
 - **konstrukcije male mase i krutosti**
- posledice:
 - **smanjenja prirodnih frekvencija konstrukcije i faktora prigušenja,**
 - **veća osetljivost na dinamička opterećenja**



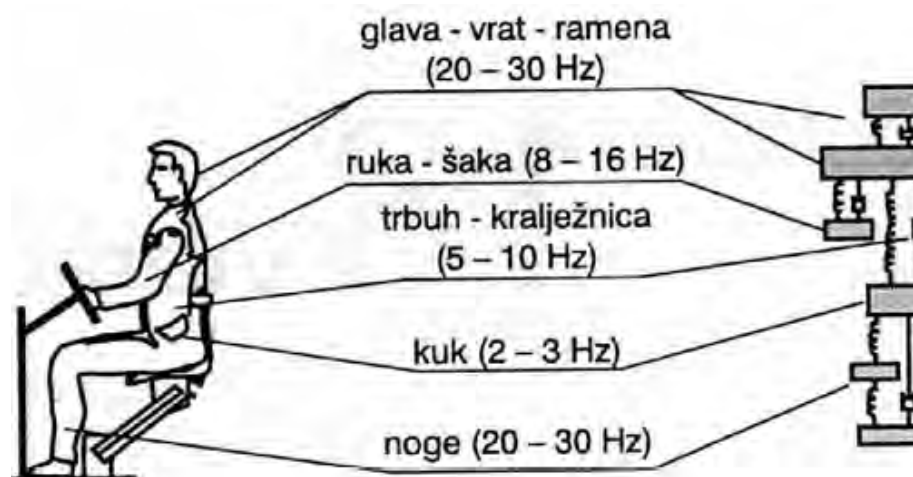
Mode 1, T=11.3s

Mode 2, T=10.2s

Mode 5 (torsion), T=4.3s

- Izvori vibracija:
 - **spoljašnji** (saobraćajno opterećenje, uključujući i kretanje pešaka kod pešačkih mostova, vetar)
 - **unutrašnji** (pešačko opterećenje kod ostalih objekata)

Uticaj vibracija na ljudsko telo



Pojednostavljeni prikaz mehaničkog uticaja vibracija na ljudsko tijelo

Podela vibracija prema visini frekvencije :

- vibracije koje izazivaju tzv. morsku bolest (*Motion sickness*) u frekventnom području 0,1-0,63 Hz,
- vibracije koje se prenose na celo telo u frekventnom području 1-80 Hz,
- vibracije koje se prenose na sistem šaka – ruka u frekventnom području 6,3 – 800 Hz.

Granice dopuštenog izlaganja vibracijama regulisane su međunarodnim normama **ISO 5349**.

Uticaj vibracija na ljudsko telo

- Veća osetljivost ljudskog tela na vibracije (pomeranje podloge na kojoj stoji, ili preko koje prelazi):
 - vertikalno pomeranje $> 10\text{mm}$
 - horizontalno pomeranje $> 2\text{mm}$
 - ubrzanje podloge $> 2\% g$

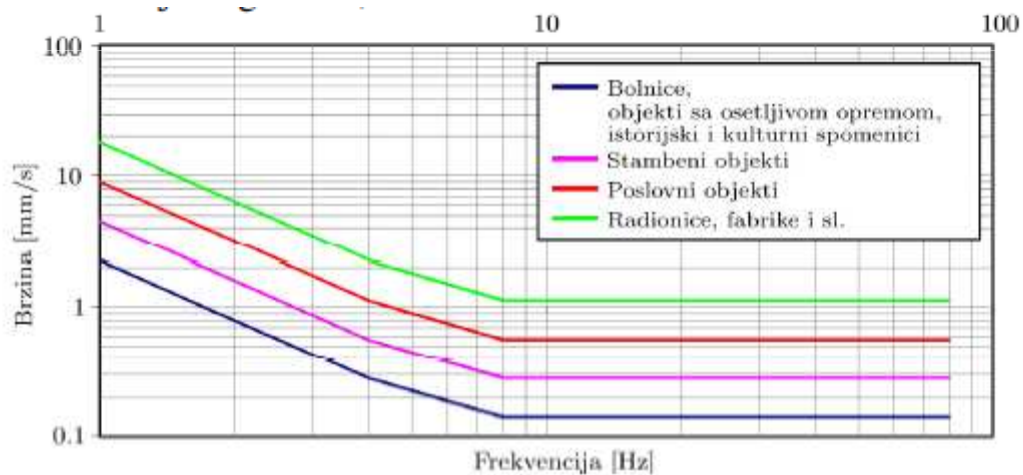


Pünt da Suransuns, Switzerland (1999)

Ljudsko telo može osjetiti vibracije s amplitudama pomeranja od svega 0,001 mm, dok su vrhovi prstiju i do 20 puta osjetljiviji.

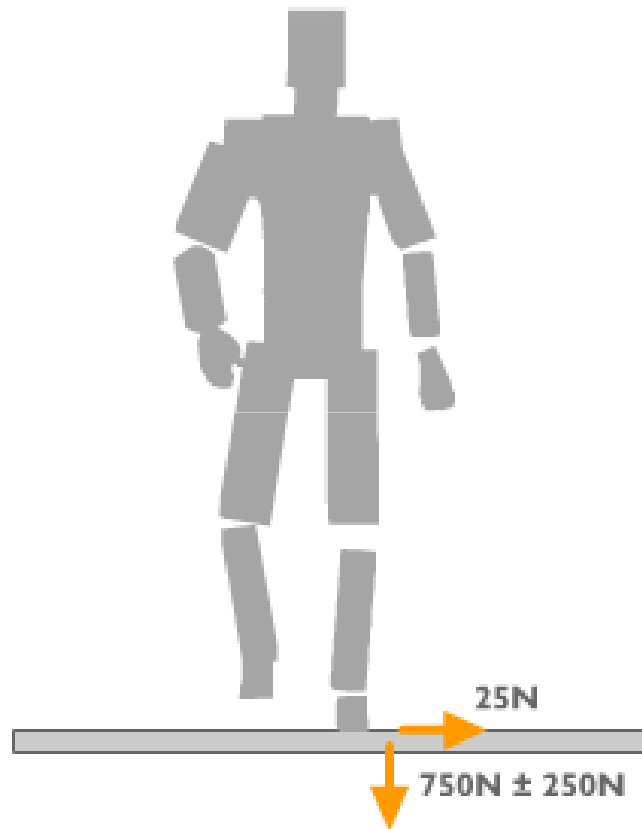
Uticaj vibracija na ljudsko telo

- Vibracije od saobraćaja mogu imati uznemiravajuće delovanje na ljude zbog neprijatnih fizičkih senzacija i buke.
- Sposobnost ljudi da osete vibracije je direktno proporcionalna brzini i frekvenciji vibracija. Internacionalna organizacija za standarde (ISO) kao i više zemalja u svetu donele su standarde koji propisuju procenu dejstva stalnih, povremenih i prolaznih vibracija na ljude u objektima (ISO 2361 [14], DIN 4150-2 [8], BS 6472 [3], i dr.).



Dozvoljene amplitude vertikalnih vibracija, PPV (mm/s) prema BS 6472:1992

Opterećenje izazvano aktivnostima ljudi

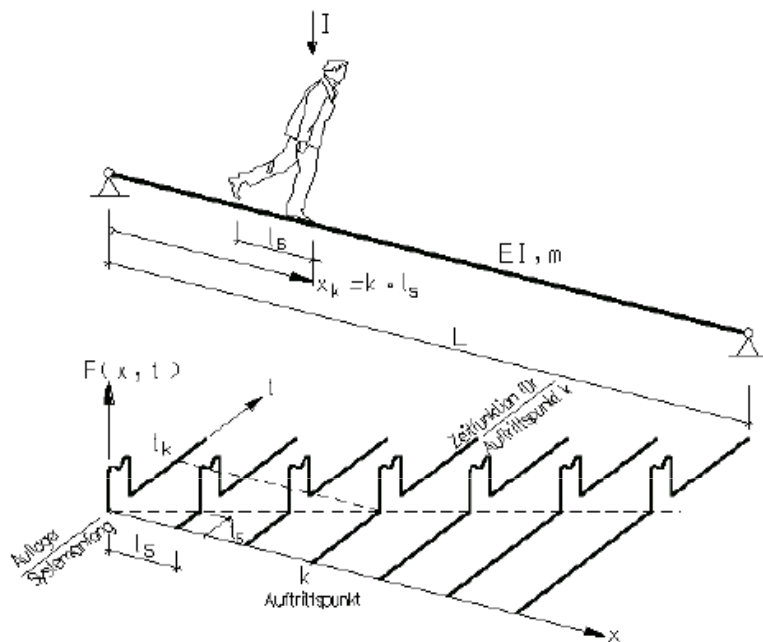


Opterećenje usled kretanja pešaka

Opsezi frekvencija tipičnih vrsta kretanja

Aktivnost	Opseg učestalosti aktivnosti, Hz (koraka/s)	
	Normalni opseg	Mereni opseg
Hodanje	1.6 – 2.2	1.0 – 3.0
Trčanje	2.2 – 3.2	1.6 – 4.0
Skakanje	2.0 – 3.0	1.4 – 4.0
Hodanje sa poskakivanjem	2.0 – 2.6	1.6 – 3.4
Trčanje u mestu	2.2 – 3.2	1.4 – 4.0

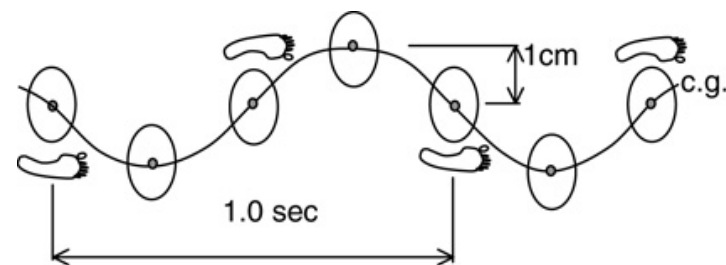
Opterećenje izazvano aktivnostima ljudi



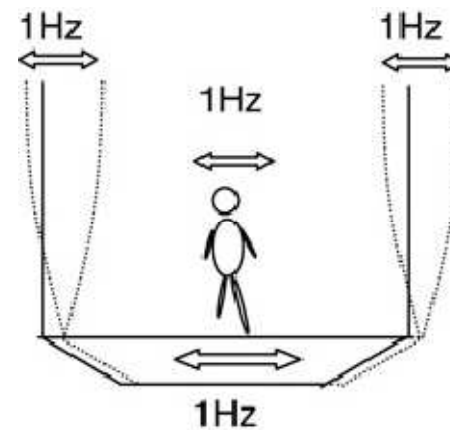
Vertikalna komponenta sile indukovane kretanjem pešaka

Lateralna komponenta dinamičke sile:

- uzrokovana bočnim oscilacijama tela
- znatno manjeg intenziteta od vertikalne komponente

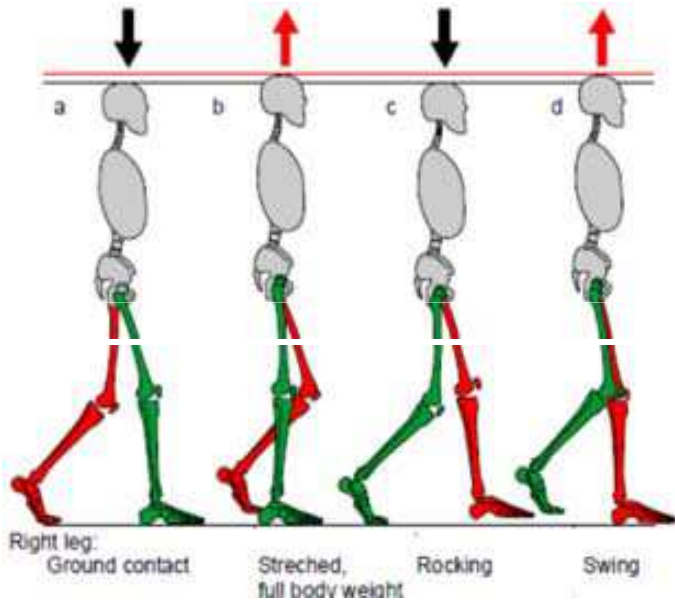


Pomeranje težišta tela tokom hoda



Mehanizam lateralnih vibracija

Vibracije međuspratnih konstrukcija



Faze pomeranja stopala i noge prilikom hoda

- ljudska aktivnost (hodanje) kod međuspratnih konstrukcija sa osnovnom frekvencijom ispod 5 Hz izaziva rezonanciju
- podovi sa osnovnom frekvencijom iznad 10 Hz mogu imati problem sa rezonancijom ako su izloženi ljudskim aktivnostima koje se ponavljaju kao što je na primer ples i aerobik

Ritmička aktivnost	Minimalne osnovne frekvencije međuspratnih konstrukcija [Hz]	
	Čelične ili betonske međuspratne konstrukcije	Lake međuspratne konstrukcije
Restorani i plesne sale	5	10
Sale za aerobik	9	13

Zahtevi u pogledu ograničenja vibracija međuspratnih konstrukcija

Sopstvena frekvencija oscilovanja konstrukcije ili delova konstrukcije treba da bude iznad određenih granica, koje zavise od namene objekta i izvora vibracija.

- Dinamičke karakteristike međuspratnih konstrukcija treba da zadovolje preporuke date u EN 1990.
- Referentni standardi za granično stanje upotrebljivosti međuspratnih konstrukcija: EN 1990, A1.4.4 , EN 1990, A2.4.3.2 , EN 1994-1-1, EN 1991-1-1, EN 1991-1-4, ISO 10137
- Preporučene maksimalne vrednosti ubrzanja bilo kojeg dela međuspratne konstrukcije:
 - 0,7 m/s² za vertikalne vibracije,
 - 0,2 m/s² za horizontalne vibracije.

Indikativne vrednosti za obezbeđivanje prihvatljivog ponašanja međuspratnih konstrukcija prema **SRPS EN 1990/NA**

Namena objekta	Obično zadovoljavajuće ponašanje	Često nezadovoljavajuće ponašanje	Preporučena granična vertikalna ubrzanja (u % od g)
Sportske dvorane, javni prostori	$n_0 > 10$ Hz	$n_0 < 6$ Hz	10 %
Stambene zgrade	$n_0 > 8$ Hz	$n_0 < 5$ Hz	0,1 %
Poslovne zgrade	$n_0 > 8$ Hz	$n_0 < 5$ Hz	0,2 %

Vibracije pešačkih mostova

- opterećenje izazvano pešacima
 - najčešće dinamičko delovanje kod pešačkih mostova
 - glavna karakteristika -mali intezitet



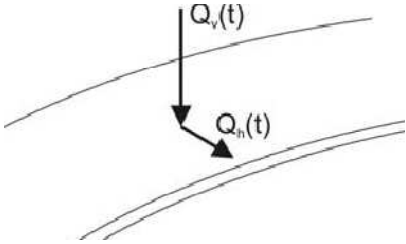
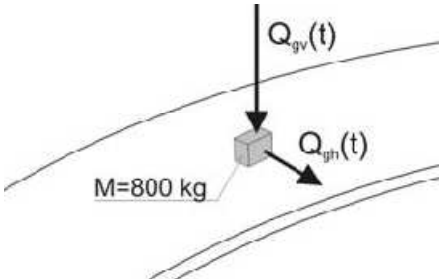
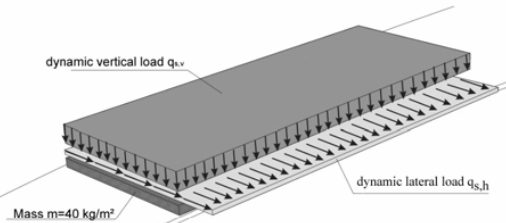
- veća osetljivost na dinamička opterećenja od pešaka, neophodne detaljnije dinamičke analize

Vibracije pešačkih mostova

Modeli opterećenja u preporukama i standardima

Prenorm of Eurocode 1, Part 1; BS 5400, Part 2 ; OHBDC ONT 83; DIN-Fachbericht 102; Eurocode 5

Modeli dinamičkih opterećenja

jedan pešak	grupa pešaka	kolona pešaka
		
vertikalna komponenta opterećenja		
$180 \cdot \sin(2\pi \cdot f_v \cdot t)$ [N]	$180 \cdot k_v(f_v) \cdot \sin(2\pi \cdot f_v \cdot t)$ [N]	$12,6 \cdot k_v(f_v) \cdot \sin(2\pi \cdot f_v \cdot t)$ [N/m ²]
lateralna komponenta opterećenja		
$70 \cdot \sin(2\pi \cdot f_h \cdot t)$ [N]	$70 \cdot k_h(f_h) \cdot \sin(2\pi \cdot f_h \cdot t)$ [N]	$3,2 \cdot k_h(f_h) \cdot \sin(2\pi \cdot f_h \cdot t)$ [N/m ²]

Eurocode 1: Part 2: modeli opterećenja i analitičke metode nisu definisane

Eurocode 5, Annex B: modeli opterećenja i analitičke metode za jednostavne sisteme

BS 6399-96 i Sétra Guide méthodologique passerelles piétonnes: ekstremna dejstva

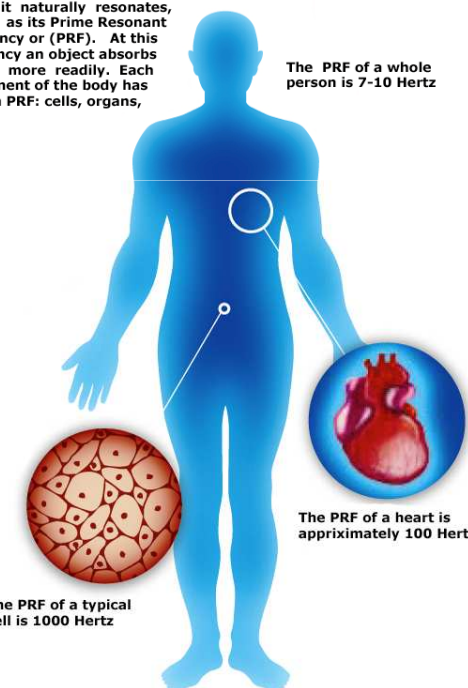
Vibracije pešačkih mostova

Kriterijumi komfora i granične vrednosti

- Ljudska percepcija vibracija -**subjektivna**
- Vibracije niskih frekvencija (do 100 Hz) -posebno nekomforne za ljude
- Frekvencije **ispod 10 Hz** -nelagodnost u abdominalnom delu tela.
- Kriterijumi upotrebljivosti u pogledu komfora:
 - **izbegavanje određenih opsega prirodnih frekvencija,**
 - **ograničenje ubrzanja.**
- Prirodna frekvencija nije u nepoželjnom opsegu -**neophodan dalji dinamički tretman**

Principles of Resonance in the human body

Everything has a frequency at which it naturally resonates, known as its Prime Resonant Frequency or (PRF). At this frequency an object absorbs energy more readily. Each component of the body has its own PRF: cells, organs, bones.

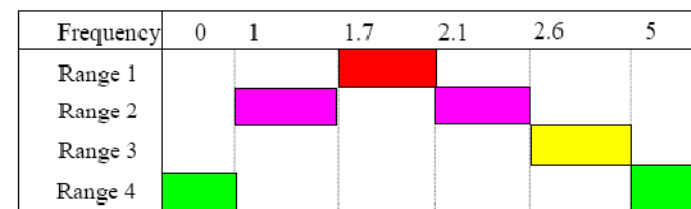


WWW.CYMASCOPE.COM/ JOHN STUART REID/ DEAN BAKER

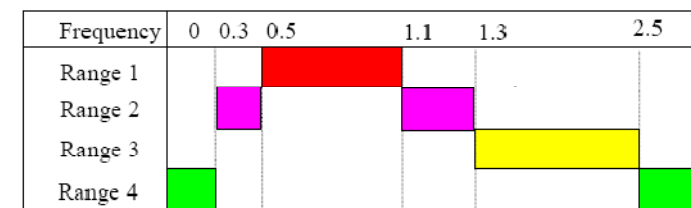
Vibracije pešačkih mostova

Kritične frekvencije i opsezi u kojima se ne sme naći prirodna frekvencija mosta, prema međunarodnim propisima

Regulativa	Granične vrednosti	
	Vertikalne	Horizontalne
American Guide Spec.	< 3 Hz	
Eurocode 2 (EN 1992-2)	1.6 Hz - 2.4 Hz	0.8 Hz - 1.2 Hz
DIN-Fachbericht 102	1.6 Hz - 2.4 Hz, 3.5 Hz - 4.5 Hz	
Eurocode 5 (EN1995-2)	< 5 Hz	< 2.5 Hz
Appendix 2 of Eurocode 0	< 5 Hz	
ISO/CD 10137	1.7 Hz - 2.3 Hz	
SIA 261 (Švajcarska)	1.6 Hz - 4.5 Hz	< 1.3 Hz trans. pravac < 2.5 Hz long. pravac
BS 5400-2 (Velika Britanija)	< 5 Hz	
Austroroads (Australija)	1.5 Hz - 3 Hz	
Japanese Footbridge Design Code	1.5 Hz - 2.3 Hz	
Canadian Highway Bridge Design Code CAN/CSA-S6-06	< 4 Hz	



Opseg frekvencija (u Hz) za vertikalne i long.vibracije prema **Sétra Guide méthodologique passerelles piétonnes**

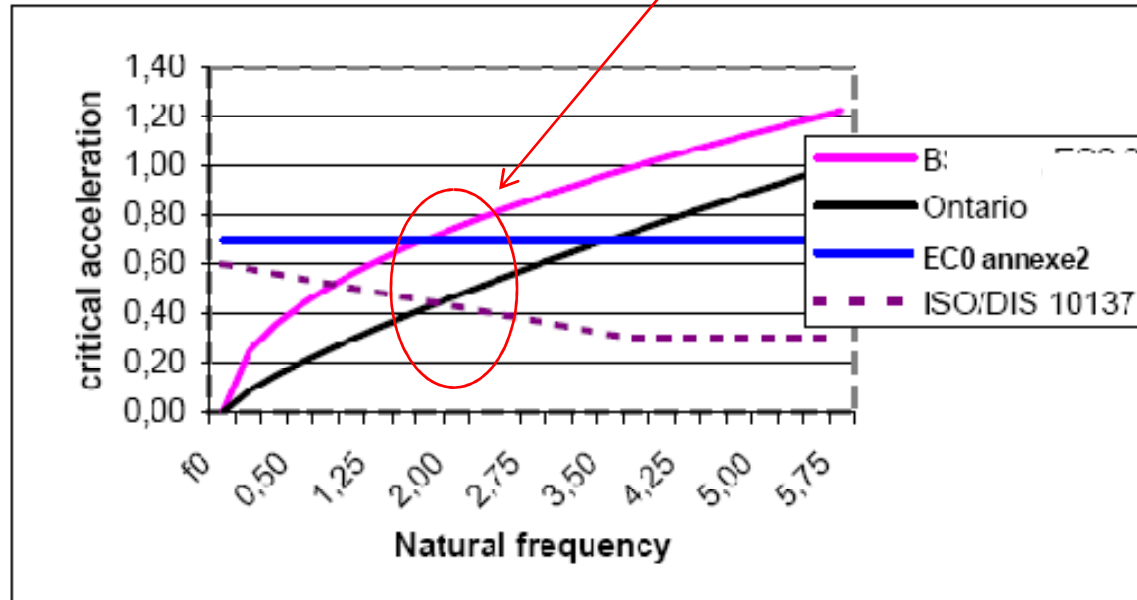


Slika 7. Opseg frekvencija (u Hz) za lateralne vibracije prema **Sétra Guide méthodologique passerelles piétonnes**

- Opseg 1:** maksimalni rizik od rezonance;
- Opseg 2:** srednji rizik od rezonance;
- Opseg 3:** mali rizik od rezonance usled standardnih opterećenja;
- Opseg 4:** neznatan rizik od rezonance.

Vibracije pešačkih mostova

Granično ubrzanje pri normalnom hod



Vertikalno kritično ubrzanje (u m/s²) u funkciji prirodne frekvencije mosta, prema različitim regulativama

Acceleration ranges	0	0.5	1	2.5
Range 1	Max			
Range 2		Mean		
Range 3			Min	
Range 4				

Opseg ubrzanja (u m/s²) za vertikalne vibracije prema *Sétra Guide méthodologique passerelles piétones*

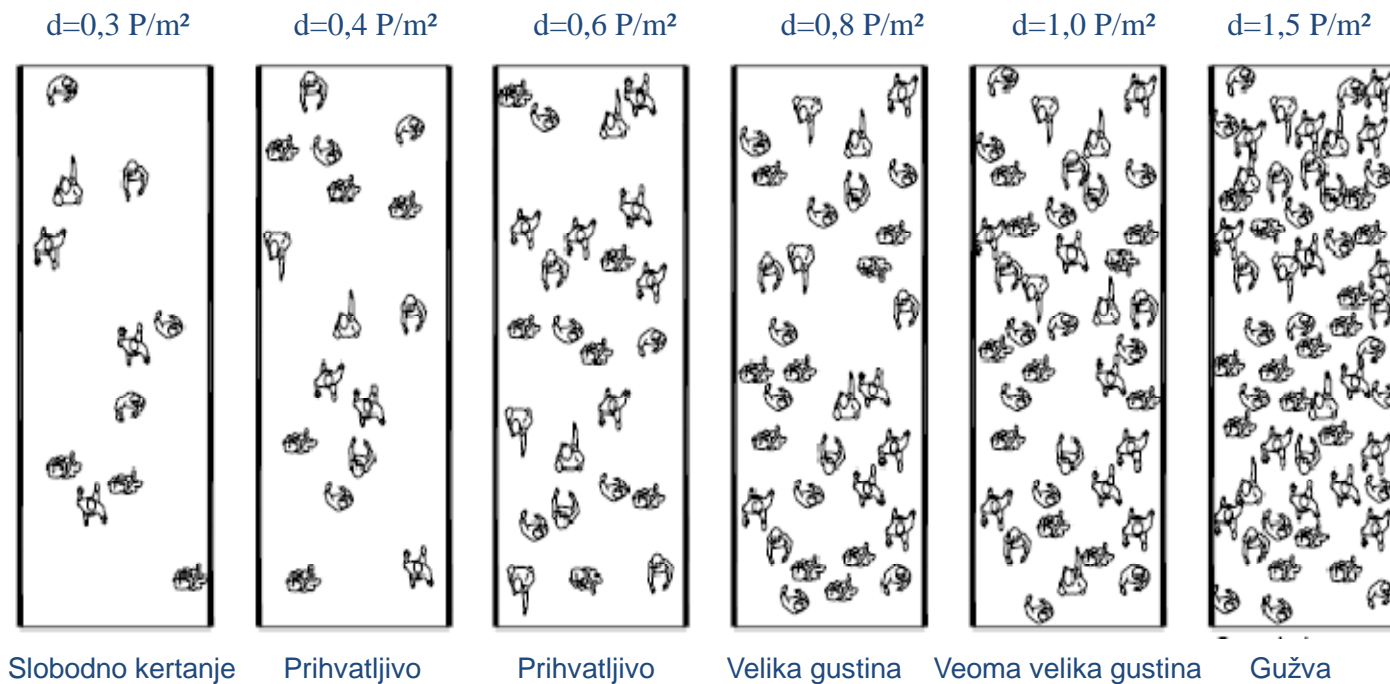
Acceleration ranges	0	0.1	0.15	0.3	0.8
Range 1	Max				
Range 2		Mean			
Range 3			Min		
Range 4					

Opseg ubrzanja (u m/s²) za horizontalne vibracije prema *Sétra Guide méthodologique passerelles piétones*

Vibracije pešačkih mostova

Gustina pešaka:

- utiče na brzinu kretanja
- mogućnost pojave "lock-in" efekta



Različiti tipovi gustine pešaka prema Oeding-u

Vibracije pešačkih mostova

“Lock-in” efekat - mehanizam nastanka

Prilikom pojave prekomernih vibracija na mostu:

- deo pešaka pokušava da održi ravnotežu
- lagano pomeranje pešaka naizmenično u jednu i drugu stranu
- instiktivno ponašanje pešaka uzrokuje približavanje frekvencije hoda i faze, upravo frekvenciji mosta
- sile indukovane pešacima ulaze u rezonanciju sa konstrukcijom
- ” Lock-in” efekat se povećava sa amplitudom vibracija mosta
- broj pešaka koji učestvuju u korektivnom kratanju raste sa amplitudom vibracija mostovske konstrukcije.
- početno slučajno pobuđenje usled delovanja grupe pešaka prerasta u rezonantno pobuđenje
- lateralne amplitude od 5 mm i frekvencija vibracija od 1 Hz u 40% slučajeva mogu dovesti do rezonacije



Vibracije pešačkih mostova

Milenijumski most u Londonu



Arhitektura: Norman Foster
Proračun konstrukcije: Arup
Skulptor: Sir Anthony Caro

- viseći pešački most
- povezuje St Paul's Cathedral (Sir Christopher Wren, XVII vek) i Bankside Tate Gallery
- raspon 330 metara
- izgradnja počela 1996.godine
- otvoren 10.juna 2000.godine
- vrednost investicije 18 miliona funti

Vibracije pešačkih mostova

Problem Milenijumskog mosta u Londonu



Dan otvaranja 10.06.2000.

- 80000-100000 ljudi prelazi preko mosta na dan otvaranja
- oko 2000 ljudi se nalazilo na mostu u istom trenutku
- pojava neočekivano velikih lateralnih vibracija na južnom i centralnom rasponu mosta
- pešaci se teško kreću i pridržavaju za ogradu
- pomeranja na južnom rasponu (50mm, frekvencija 0.77 Hz) između Bankside i prvog rečnog stuba predstavljaju kombinaciju horizontalnih i torzionih oscilacija
- centralni raspon se pomera uglanom horizontalno 70mm sa frekvencijom 0.95Hz
- most je zatvoren za upotrebu posle dva dana

<https://www.youtube.com/watch?v=y2FaOJxWqLE>

Vibracije pešačkih mostova

Ispitivanje Milenijumskog mosta u Londonu



Hidraulični šejker sa opremom za horizontalno pobuđenje mosta

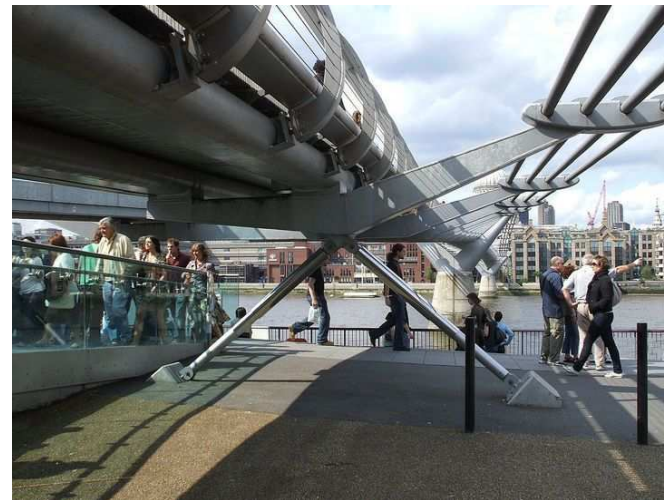
- 15.06.2000.godine počinje ispitivanje mosta postavljanjem instrumenata (mehaničkih šejkera kao i male meteorološke stanice za beleženje efekata vetra i temperature na ponasanje mosta)
- Ispitavnja pokazuju da dinamičko dejstvo vetra nema uticaja na pojavu prekomernih vibracija, dok dejstvo veće grupe pešaka pri sinhronim aktivnostima znatno pobuđuje konstrukciju
- “Lock-in” efekat pri lateralnim pomeranjima mosta izdvaja se kao dominantan uzrok za pojavu prekomernih vibracija
- Laboratorijska ispitivanja, sa ciljem preciznijeg utvrđivanja mehanizma ljudskog hoda vrše se na Institute of Sound and Vibration Research na Univerzitetu Southampon i na Imperial College-u u Londonu.

Vibracije pešačkih mostova

Sanacija Milenijumskog mosta u Londonu



- ugrađeno je preko 90 apsorbera (viskoznih i sa podesivom masom) za prijem lateralnih i vertikalnih vibracija
- ponovo otvoren 27.februara 2002.godine
- torškovi sanacije 5 miliona funti



Vibracije pešačkih mostova

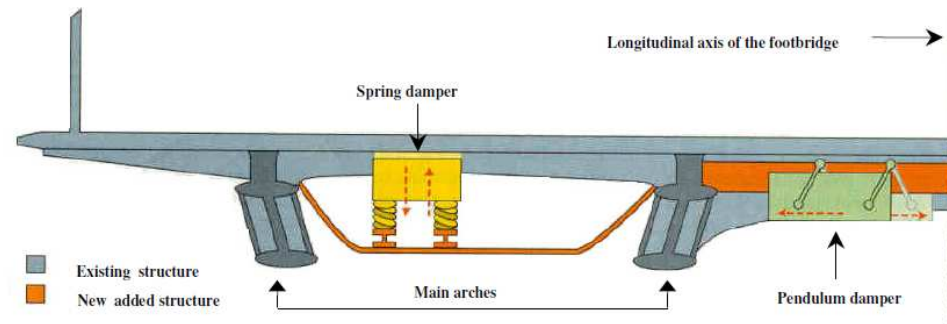
Solferino most u Parizu



Arhitektura: Marc Mimram



- raspon 140 metara
- izgradnja trajala od juna 1995. do juna 1996. godine
- 1999. godine primećene su prekomerne vibracije prilikom prelaska pešaka
- ubrzo se ugrađuje 6 apsorbera (sa podesivom masom-TDM) horizontalnih vibracija i 8 apsorbera sa podesivom masom za ublažavanje vertikalnih vibracija, bez narušavanja izvornog dizajna mosta



Vibracije pešačkih mostova



- 2002.godine rade se ispitivanja efikasnosti ugađenih dampera i provera dinamičkih karakteristika mosta
- 2003.godine izvedena su obimna ispitivanja u cilju određivanja kritičnog broja pešaka potrebnog za prekomerno pobuđivanje konstrukcije, kao i boljeg razumevanja fenomena sinhronizacije hoda pešaka i lateralnih vibracija mosta.



Akselerometri



Uređaj za mehaničku ekscitaciju

Reference:

- Marija Spasojević Šurdilović: Analiza graničnog stanja upotrebljivosti pešačkih mostova u pogledu vibracija indukovanih pešacima, doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, 2014.
- Ljiljana Kozarić: Vibracije izazvane ljudskim delovanjem kod spregnutih međuspratnih konstrukcija, Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet u Subotici, 2016.
- M. Quilligan, Presentation: The Relevance of Structural Dynamics, Millennium Bridge-London, KTH-Byggkonstruktion, Sweden (2001)
- Vibration Protection for Structures, Buildings, Machinery and other Equipment with Tuned Mass Dampers. www.gerb.com
- M. Petronijevic, M. Nefovska-Danilovic, M. Radišić, M. Jockovic: Istraživanje dejstva vibracija na ljude i objekte u cilju održivog razvoja gradova, 15. kongres DGKS, 6-8.9.2018, Zlatibor
- Cornell University. "Explaining Why The Millennium Bridge Wobbled." ScienceDaily. 3 November 2005. www.sciencedaily.com/releases/2005/11/051103080801.htm
- https://www.researchgate.net/publication/236029888_Methodology_for_modal_testing_of_the_Millennium_Bridge_London
- Sétra Guideméthodologique passerelles piétones. , Sétra. Service d'études techniques des routes et autoroutes, Paris, 2006.
- C. Cremona: Dynamic investigations of the Solferino footbridge, IOMAC'09 – 3rd International Operational Modal Analysis Conference, 4-6 May 2009, Portonovo, Italy