



Rozvojové projekty MŠMT
Rozvojové projekty mladých týmů
RPMT 2018

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

NAVRHOVÁNÍ LÁVEK CITLIVÝCH NA DYNAMICKÉ ÚČINKY CHODCŮ



Obsah

1. Úvod	3
2. Mosty pro pěší a cyklisty	3
2.1. Druhy mostů	3
2.2. Průchozí profil a sklony na lávce	4
3. Konstrukční materiály lávek	5
3.1. UHPC.....	5
4. Statické zatížení dopravou na lávkách	7
4.1. Modely statického zatížení dopravou na lávkách	7
4.1.1. Svislé zatížení.....	7
4.1.2. Vodorovné zatížení.....	8
4.2. Sestavy zatížení dopravou na lávkách	9
4.3. Zatížení na zábradlí.....	9
4.4. Kombinační součinitele	9
5. Dynamická analýza lávek.....	9
5.1. Návrhové situace	10
5.1.1. Třídy pohody.....	10
5.1.2. Třídy provozu.....	11
5.2. Postup dynamické analýzy dle JRC	11
5.2.1. Krok 1: Vlastní frekvence a tvary kmitání.....	11
5.2.2. Krok 2: Ověření hodnot vlastních frekvencí	13
5.2.3. Krok 3: Návrhové situace.....	13
5.2.4. Krok 4: Odhad tlumení	13
5.2.5. Krok 5: Hodnoty zrychlení při návrhových situacích	15
5.2.6. Krok 6: riziko vzniku efektu „Lock-in“	17
5.2.7. Krok 7: Kontrola mezních hodnot zrychlení	18
5.3. Vandalismus	18
6. Opatření proti nadměrnému kmitání lávky.....	19
6.1. Optimalizace tíhy konstrukce	19
6.2. Optimalizace tuhosti konstrukce.....	19
6.3. Optimalizace útlumu	19
6.3.1. Viskózní tlumič.....	19
6.3.2. Pohlcovač kmitání TMD.....	20
7. Příklady zajímavých konstrukcí.....	21
8. Doplnující modely zatížení.....	27

8.1.	Model dynamického zatížení běžci	27
8.2.	Model zatížení jediným vandalem	28
8.3.	Model zatížení skupinou vandalů	28
9.	Reference	29

1. Úvod

Mosty pro pěší a cyklisty jsou velice atraktivním typem konstrukce. Poměrně nízké proměnné zatížení ve srovnání se zatížením stálým umožňuje návrh a výstavbu extravagantních konstrukcí. Při takovémto návrhu však nesmí být vedle statické analýzy opomenuta důležitost dynamického posouzení, které nezřídka bývá rozhodujícím.

Motivací pro vytvoření tohoto textu je zacelení mezery ve studijním programu, kterou je absence podrobnějšího popisu postupu dynamické analýzy lávky. Cílem textu je shrnout dnes používané metodiky a doporučené postupy pro posouzení dynamického chování lávky a jeho optimalizaci.

Součástí tohoto shrnutí jsou také statické modely zatížení uvedené v [1], zmíněny jsou také dnes užívané moderní materiály pro stavbu lávek.

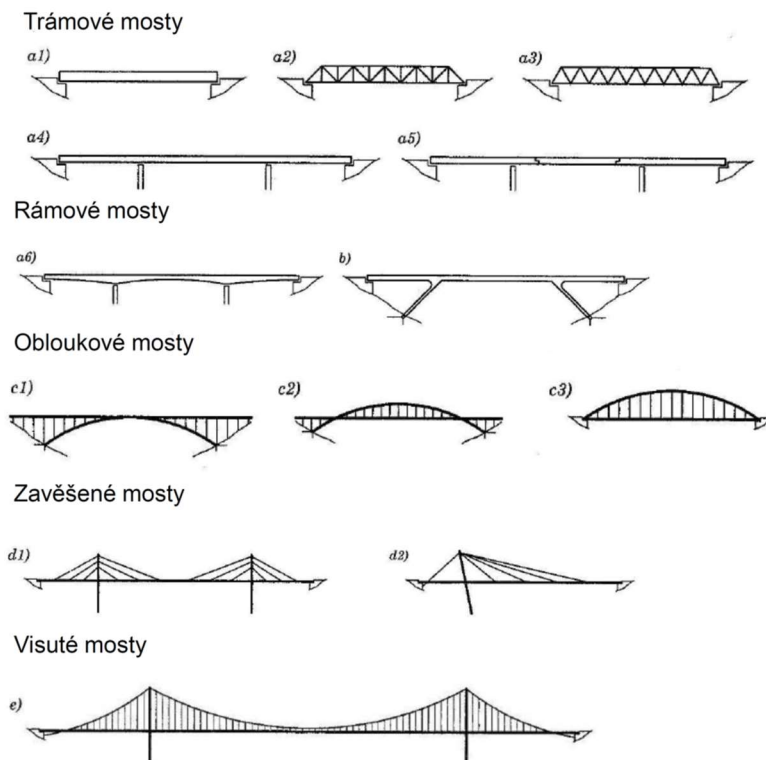
2. Mosty pro pěší a cyklisty

Lávky jsou mosty určené pro provoz pěších a cyklistů. Nižší proměnné zatížení přináší větší volnost z hlediska architektonického návrhu. Mosty jsou obecně štíhlé konstrukce vystavené pro překonání delší vzdálenosti. V porovnání s běžnými silničními a železničními mosty jsou lávky subtilnější, a proto jsou velmi citlivé na dynamické účinky. Zřetel je třeba brát především na dynamické namáhání vyvozené provozem pěších na lávce.

Kmitání může způsobit havárii či poruchu konstrukce, v menší míře pak znepříjemnit přechod lávky. Proto musí být brán ohled i na komfort uživatelů lávky.

2.1. Druhy mostů

V tomto odstavci jsou uvedeny hlavní nosné systémy mostů. Jak již bylo řečeno, je tomu především u lávek, kde vznikají zajímavé a nevšední systémy, velmi často je tomu tak právě kombinací základních konstrukčních typů, které jsou shrnuty níže.



Obr. 1 Hlavní nosné systémy mostů

POZN.: a₁) Deskový most; a₂) Příhradový most; a₃) Most příhradový – bezsvislicové uspořádání; a₄) Trámový most - spojitý nosník; a₅) Trámový most - spojitý nosník s vloženým polem

b₁) Rámový most; b₂) Vzpěradlový most

c₁) Obloukový most s horní mostovkou; c₂) Obloukový most s mezilehlou mostovkou; c₃) Obloukový most s dolní mostovkou

d₁) Zavěšený most s poloharfovitým uspořádáním závěsů; d₂) Zavěšený most s vějířovitě uspořádanými závěsy

e₁) Visutý most

2.2. Průchozí profil a sklony na lávce

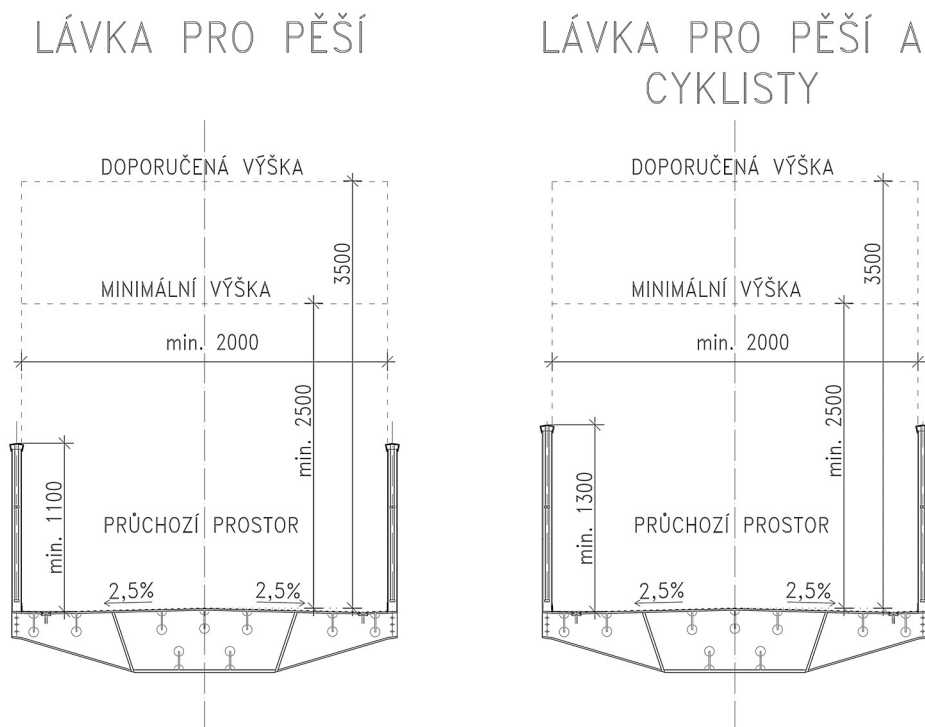
Průchozí profil na lávce musí být zajištěn minimálně do výšky 2,5 m nad pochozí povrch, doporučená hodnota je však 3,5 m. Minimální průchozí šířka, která musí být dodržena, je 2 m. Průchozí prostor pro jednu osobu je uvažován v šířce 0,75 m. Šířky průchozího prostoru pro chodce jsou běžně navrhovány v násobcích 0,75 m. Výška zábradlí nad pochozím povrchem je minimálně 1,1 m.

Na lávkách, kde je umožněn průjezd cyklistů, musí být dodržena minimální průjezdná šířka 2,0 m. Uvažovaná šířka průjezdného profilu pro jednoho cyklistu je 1,0 m. Výška zábradlí musí být v tomto případě minimálně 1,3 m nad pojížděným povrchem.

V případě současného obousměrného provozu pěších a cyklistů na lávce je doporučená hodnota průchozí šířky 3,5 m.

Pro dostatečné odvodnění jsou stanoveny doporučené hodnoty příčného a podélného sklonu. Minimální příčný sklon pro zajištění odvodnění desky mostovky je 2,5 %. Minimální podélný sklon je 1,0 %.

Rozměry lávky v příčném směru jsou popsány na **obr.2**.



Obr. 2 Příčné uspořádání lávky

3. Konstrukční materiály lávek

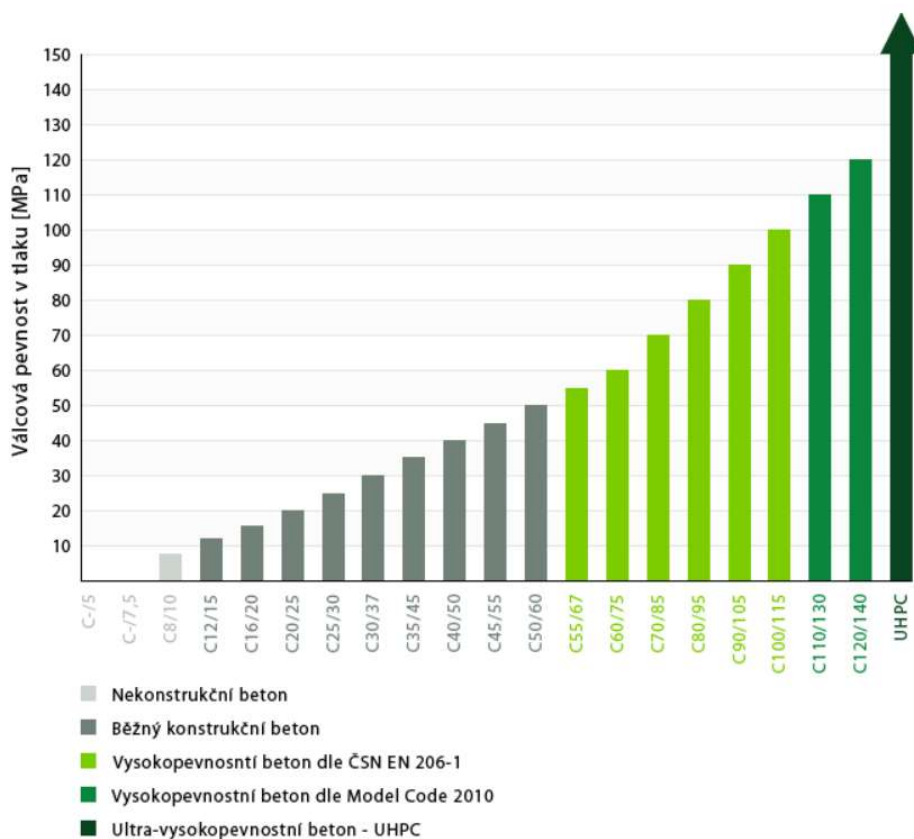
Stejně jako u ostatních typů mostních konstrukcí jsou hlavními materiály pro výrobu lávek pro pěší ocel a beton. Díky menším užitným zatížením na lávkách pro pěší je možné navrhovat subtilnější konstrukce s nízkou stavební hmotností. Díky tomu je dalším hojně využívaným materiálem dřevo, a to i u lávek s větším rozpětím. Využíváno je jak rostlé dřevo, tak dřevo lepené. Využití rostlého dřeva je ovšem značně omezeno dimenzemi prvků.

Kromě tradičních materiálů se u moderních lávek můžeme čím dál častěji setkat s různými kompozitními materiály (GFRP – glass fiber reinforced polymer, CFRP – carbon fiber reinforced polymer) nebo také s vysokohodnotnými betony (HPC – High Performance Concrete, UHPC – Ultra High Performance Concrete). Tyto materiály jsou často používány pro jednotlivé konstrukční prvky. V několika málo případech se dá najít aplikace pro celou konstrukci lávky vyrobenou z uvedených moderních materiálů.

3.1. UHPC

Dále se podrobněji budeme věnovat ultra vysokohodnotným betonům UHPC. Touto zkratkou jsou nejčastěji označovány kompozity na bázi cementu se svou charakteristickou jemnozrnnou strukturou dosahující vysokých pevností v tlaku. Nejčastěji jsou tak v literatuře označovány betony překračující svou pevností v tlaku hodnotu 150 MPa. Další důležitou vlastností je vysoká reziduální pevnost v tahu za ohybu po vzniku trhliny s vysokou lomovou energií a vysokou duktilitou. [6] Shrnutí pevnostních tříd betonu je zobrazeno na **obr.3**.

Pokud jde o materiálové vlastnosti UHPC a způsob jejich dosažení, jsou hlavními charakteristikami pevnost a trvanlivost. Vysoké trvanlivosti je převážně docíleno nízkou pórovitostí kameniva, čímž je ztížen vstup agresivních látek do betonu a také je zajištěna mrazuvzdornost. Díky vysoké trvanlivosti je normově dovoleno navrhovat nižší krytí betonářské nebo předpínací výztuže. Celkově nižší obsah pórů v betonu pak právě zajišťuje vysokou pevnost. Toho je docíleno využitím velmi jemných částic ve směsích UHPC. Nejčastěji využívanými přísadami jsou křemičitý úlet nebo mikrosilika.



Obr. 3 Kategorizace pevnostních tříd betonu

V současné době neexistuje žádná mezinárodně uznávaná norma pro navrhování konstrukčních prvků z UHPC. Až do pevnosti betonu C120/140 lze využít fib Model Code 2010 vydaný v roce 2013. Z tohoto předpisu vycházejí principiálně i ostatní normy. Například ve Francii je využíván předpis SETRA/AFGC, ten předepisuje průkazné materiálové zkoušky, ale již neuvažuje UHPC vyztužený nesoudržnou výztuží. V Německu byly veškeré předpisy pro UHPC publikovány v BetonKalendaru.

V České republice vyšly v roce 2010 Technické podmínky pro vysokohodnotné betony pro mosty pozemních komunikací (TP 226). Ty ovšem platí pouze pro pevnostní třídy betonu od C55/67 do C90/C105. Pro vyšší třídy pevnosti je doporučeno využívat principy uvedené v Eurokódu a materiálové charakteristiky stanovit na základě průkazných zkoušek. V rámci projektu „Aplikovaný výzkum ultravysokohodnotného betonu pro prefabrikované prvky“ vznikly tři svazky metodiky pro navrhování prvků z UHPC.

- Metodika 1 – Metodika pro návrh UHPC a pro materiálové zkoušky
- Metodika 2 – Metodika pro navrhování prvků z UHPC
- Metodika 3 – Metodika pro výrobu prvků z UHPC a pro kontrolu jejich provedení

Co se týče jednotlivých surovin, z kterých je UHPC vyrobeno, jedná se o ty nejvyšší kvality materiálu a nejmodernější chemické přísady zkombinované tak, aby byl vytvořen materiál takových vlastností, jako je UHPC.

Cement se víceméně neliší od cementu používaného v normálních betonových směsích, nejčastěji se používá portlandský, jen je přidáván ve vyšším množství, než je u betonu běžné. U kameniva je důležitá jeho kvalita, pevnost a také správná zrnitost, někdy bývá omezena velikost největšího zrna na maximálně 1 mm. Nejčastěji je využíváno čedičové kamenivo díky své vysoké pevnosti. Vodní součinitel je velmi nízký, nejčastěji 0,20–0,25. Z přísad hrají v UHPC směsích hlavní roli

plastifikátory, aby bylo možné snížit obsah vody a tím dosáhnout vyšších pevností výsledného betonu. Jak již bylo řečeno v úvodu této kapitoly, nejdůležitější je velmi nízká mezerovitost betonu. Toho je docíleno příměsí jemnozrnných materiálů jako je křemičitý úlet nebo mikrosilika, neobvyklé nejsou ani vysokopecní strusky nebo popílek. Pro dosažení těch nejvyšších pevností a dosažení vysoké duktility jsou do UHPC betonových směsí přidávána často vlákna. Tou nejosvědčenější volbou jsou zastudena tažená ocelová drátka o pevnosti v tahu 2000 MPa, délky maximálně 20 mm a průměru do 3 mm, dají se také využít vlákna polymerní nebo skleněná.

4. Statické zatížení dopravou na lávkách

Postup statické analýzy lávek je obdobný jako pro běžné mosty a není tedy předmětem tohoto textu. Vzhledem k tomu, že text je zaměřen na lávky citlivé na účinky chodců, jsou pro úplnost níže definovány statické modely zatížení dopravou (provozem pěších a cyklistů) definované normou [1].

Tyto modely zatížení mají být použity nejenom pro návrh konstrukcí lávek pro chodce, ale i pro mosty silniční a železniční, chodníky a cyklistické pruhy. Uvedené modely a hodnoty zatížení jsou uvažovány včetně dynamických účinků.

4.1. Modely statického zatížení dopravou na lávkách

Užitná zatížení na lávkách jsou zapříčiněna nejenom provozem pěších a cyklistů. Pokud není vjezd na lávku omezen, musí být uvažováno i s výskytem obslužného vozidla na lávce. Dále mohou vznikat zatížení při mimořádných návrhových situacích, jako jsou případné nárazy vozidel do nosné konstrukce lávky či do opěr.

[1] uvádí charakteristické hodnoty zatížení určené pro stanovení statických účinků zatížení od chodců a cyklistů při ověření mezního stavu únosnosti a při jednotlivých ověřeních mezního stavu použitelnosti.

4.1.1. Svislé zatížení

Svislé zatížení je definováno třemi modely. Rovnoměrné zatížení, zatížení soustředěné a zatížení vyvozené obslužným vozidlem.

4.1.1.1. Rovnoměrné zatížení

Obecně je zatížení od provozu cyklistů nižší než zatížení od pěší dopravy. Rovnoměrné zatížení představuje souvislý dav či skupinu pěších na lávce. Zatížení je definováno charakteristickou hodnotou g_k [kN/m²]. Doporučená hodnota zatížení je $g_k=5\text{kN/m}^2$. Umístění rovnoměrného zatížení na pochozích částech lávky by mělo být provedeno s uvážením nepříznivých částí příčinkových ploch. Je tedy nutno podotknout, že definování pouze jednoho zatěžovacího stavu, kdy je rovnoměrné zatížení umístěno po celé ploše lávky, nemusí vyvozovat nejnepříznivější účinky.

Hodnota rovnoměrného zatížení 5 kN/m² vychází z modelu zatížení 4 (zatížení davem lidí). Pokud není předpokládáno riziko výskytu hustého provozu osob, je možné uvažovat hodnoty rovnoměrného zatížení následovně.

$$g_{fk} = 2,0 + \frac{120}{L+30} \quad [\text{kN/m}^2]$$

$$g_{fk} \in < 2,5; 5,0 > \quad [\text{kN/m}^2]$$

Kde L [m] je zatěžovací délka lávky.

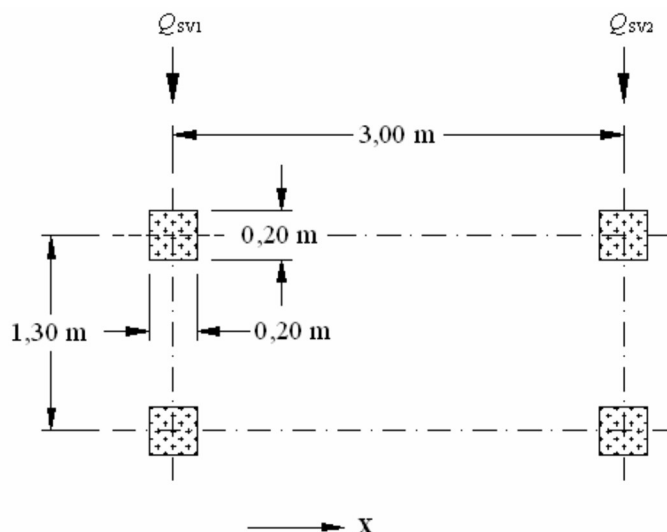
4.1.1.2. *Soustředěné zatížení*

Soustředěné zatížení Q_{fwk} [kN] je uvažováno pro posouzení lokálního namáhání konstrukce lávky. Doporučená hodnota soustředěného zatížení je $Q_{fwk}=10$ kN. Soustředěné zatížení působí na čtvercovou plochu o straně 0,10 m. Soustředěné zatížení je uvažováno pouze, pokud není stanoveno zatížení obslužným vozidlem (pokud je vjezd vozidel na lávku zabráněno).

4.1.1.3. *Obslužné vozidlo*

Pokud je uvažována možnost výskytu obslužného vozidla na lávce, musí být uvažována hodnota zatížení Q_{serv} [kN]. Obslužným vozidlem není uvažováno pouze vozidlo údržby, ale i možnost výskytu vozidla záchranné služby či hasičského vozidla.

Pokud není stanoveno jinak, má být uvažováno dvounápravové vozidlo o hmotnosti 12 tun. Servisní vozidlo je zobrazeno na obr.4.



Obr. 4 Schéma servisního vozidla [1]

POZN.: Osa x je podélnou osou vozidla. Síly Q_{svi} udávají sílu na jednu nápravu, tj. síla na jedno kolo servisního vozidla je rovna $\frac{Q_{svi}}{2}$.

$$Q_{serv} = Q_{sv1} + Q_{sv2} \text{ [kN]}$$

$$Q_{sv1} = 80 \text{ kN}$$

$$Q_{sv2} = 40 \text{ kN}$$

4.1.2. *Vodorovné zatížení*

Zatížení má být uvažováno vodorovnou silou Q_{fk} [kN] působící v úrovni vozovky ve směru podélné osy lávky. Vodorovné zatížení působí současně se svislým zatížením. Charakteristická hodnota vodorovné síly je stanovena takto:

$$Q_{fk} = \max. (0,1 * q_{fk} * L; 0,6 * Q_{serv}) \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Toto zatížení je obecně dostačující pro kontrolu podélné stability lávky. Pro zajištění vodorovné stability lávky mají být uvažována vhodná konstrukční opatření, případně mohou být definována dodatečná zatížení působící vodorovně v příčném směru.

4.2. Sestavy zatížení dopravou na lávkách

Jak již bylo řečeno, svislé a vodorovné síly od dopravního zatížení mají být uvažovány současně. Současné působení jednotlivých modelů zatížení je definováno v **tab.1**. Každá sestava zatížení musí být uvažována jako samostatné charakteristické zatížení pro kombinaci se zatíženími stálými a jinými zatíženími proměnnými (ne dopravní).

Druh zatížení		Svislé síly		Vodorovné síly
zatěžovací systém		rovnoměrné zatížení	obslužné vozidlo	
sestava zatížení	gr1	g_{fk}	0	Q_{fk}
	gr2	0	Q_{serv}	Q_{fk}

Tab. 1 Skupiny zatížení

POZN.: Vodorovné zatížení není uvažováno v případě působení soustředěného zatížení.

4.3. Zatížení na zábradlí

Při návrhu lávky nesmí být opomenuty síly přenášené zábradlím do její konstrukce. Zatížení na zábradlí má být uvažováno jako proměnné zatížení. Doporučená hodnota proměnného zatížení na zábradlí je 1 kN/m, a to ve směru svislém i vodorovném. Toto liniové zatížení působí v horním líci zábradlí.

POZN.: Ve Skandinávii existují zvláštní požadavky na zábradlí z důvodu zvýšeného namáhání zábradlí při odhrnování sněhu. Vodorovné zatížení na zábradlí je tak uvažováno hodnotou 4 kN/m.

4.4. Kombinační součinitele

V **tab.2** jsou uvedeny kombinační součinitele pro proměnná zatížení vyskytující se na lávce.

Zatížení	Značka	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Zatížení dopravou	gr1	0,40	0,40	0,00
	$Q_{fw,k}$	0,00	0,00	0,00
	gr2	0,00	0,00	0,00
Zatížení větrem	$F_{w,k}$	0,30	0,20	0,00
Zatížení teplotou	T_k	0,60	0,60	0,50
Zatížení sněhem	$Q_{Sn,k}$ (během provádění)	0,80	-	0,00
Zatížení staveništní	Q_c	1,00	-	1,00

Tab. 2 Kombinační součinitele

5. Dynamická analýza lávek

Díky novým materiálům lze navrhovat lávky stále lehčí a subtilnější. Nicméně právě to je důvodem, proč se konstrukce stávají více citlivější na buzení dynamické odezvy. Konstrukce lávek během posledních let stále častěji vykazovaly problémy s dynamickou odezvou při přechodu chodců, které nebyly zjištěny do té doby, než byla lávka uvedena do provozu. To poukázalo na fakt, že nejenom statická analýza, ale i dynamická odezva lávky na dopravní zatížení musí být prověřena.

Chodci na lávce mohou svým krokem zapříčinit vznik rezonance, a to pokud se frekvence kroku chodců shoduje s některou z vlastních frekvencí lávky. Tyto síly vyvozené lidským krokem je proto nutno uvažovat při ověření mezních stavů kmitání.

Dle [1] mají být určeny vlastní frekvence lávky. Pokud se některá z vlastních frekvencí lávky nachází v kritické oblasti frekvencí, které jsou definovány v národní příloze [1], musí být provedeno ověření lávky z hlediska dynamického zatížení chodci. Kritická oblast frekvencí pro svislé kmitání je od 1,3 do 2,3 Hz, pro nízko tlumené konstrukce, jako jsou lávky, také oblast frekvencí od 2,6 do 4,6 Hz. Kritické oblasti frekvencí vodorovného kmitání hlavní nosné konstrukce lávky v příčném směru jsou od 0,5 do 1,2 Hz a pro nízko tlumené konstrukce i 2,6 až 3,4 Hz. Vlastní frekvence a tvary kmitání mají být určeny pomocí vhodného výpočetního modelu.

Dynamická analýza obsahuje, mimo výše zmíněné vlastní frekvence a tvary kmitání, také odhad tlumení konstrukce a výpočet vynuceného kmitání od chodců. V analýze je ověřeno:

- zrychlení konstrukce je v přípustných mezích
- riziko vzniku efektu „lock-in“
- při úmyslném rozkmitání lávky (vandalismus) nedojde k poruše či havárii

POZN.: Posouzení konstrukce z hlediska dynamické odezvy by mělo být uváženo již v brzkých fázích jejího návrhu. V případě nutnosti tak může být návrh upraven ještě ve fázi projektu. Tím lze předejít dodatečné instalaci tlumicího zařízení na hotovou konstrukci lávky.

Před uvedením do provozu musí být měření ověřeny skutečné vlastní frekvence a hodnoty útlumu lávky s hodnotami získanými výpočtem. Na základě výsledků měření na skutečné konstrukci lávky je rozhodnuto o nutnosti instalace pohlcovače kmitání.

5.1. Návrhové situace

Pro provedení dynamické analýzy je nutné stanovit účel a předpokládané využití konstrukce. Je zřejmé, že vytiženější jsou lávky situované v centru města, u škol nebo stadionů, než lávky na krajích obce či v parcích. Mimo běžný provoz na lávce je nutné uvažovat i události, které mohou na lávce nastat výjimečně. Těmi může být otevření lávky, kdy je možné očekávat větší zájem lidí a různé společenské akce, koncerty, závody či průvody.

POZN.: Úmyslné rozkmitávání konstrukce a jiné formy vandalismu jsou na lávkách situovaných u stadionů velice pravděpodobné. Tyto lávky je proto vhodné navrhovat tak, aby žádná z vlastních frekvencí nebyla v kritické oblasti z hlediska buzení lidským krokem. Kmitání takové konstrukce je poté prakticky nemožné vybudit jinak než za použití sofistikovaných budicích přístrojů.

Návrhové situace definuje zadavatel projektu s přihlédnutím k požadavkům správce a vlastníka objektu. Každá situace je definována třídou pohody a třídou provozu.

5.1.1. Třídy pohody

Komfort chodců na lávce lze definovat pomocí hodnot zrychlení hlavní nosné konstrukce lávky. Třídy pohody musí být stanoveny v souladu s tabulkou NA.7 (viz **tab.3**) uvedenou v národní příloze [1].

Třída pohody	Svislé zrychlení [m/s ²]	Vodorovné zrychlení [m/s ²]
Vysoká	≤ 0,50	≤ 0,10
Normální	≤ 0,70	≤ 0,20
Nízká	≤ 1,00	≤ 0,40

Tab. 3 Třídy pohody

POZN.: *Není-li stanoveno jinak, má být použita třída pohody „normální“. Mezní hodnoty zrychlení uvedené v národní příloze eurokódu [1] jsou přísnější než mezní hodnoty zrychlení dle metodiky [2].*

5.1.2. Třídy provozu

Podle předpokládané intenzity provozu jsou vypočítány harmonické budící síly, dle kterých jsou určeny vyvolané hodnoty zrychlení při přechodu chodců. Třídy provozu musí být stanoveny v souladu s tabulkou NA.8 (viz **tab.4**) uvedenou v národní příloze [1].

Třída provozu	Intenzita provozu [os./m ²]
Velmi nízký	0,10; nejméně (15/(B*L))
Nízký	0,20; nejméně (15/(B*L))
Hustý	0,50; nejméně (15/(B*L))
Velmi hustý	1,00
Mimořádně hustý	1,50
<i>B [m] je šířka průchozího profilu; L [m] je rozpětí lávky</i>	

Tab. 4 Třídy provozu

POZN.: *Není-li stanoveno jinak, má být použita třída provozu „hustý“. Třídy provozu stanovené v metodice [2] jsou shodné s výše uvedenými hodnotami.*

5.2. Postup dynamické analýzy dle JRC

V České republice má být dynamická analýza provedena dle metodiky [2] s dodržением požadavků na třídy pohody a třídy provozu (viz tab.3 a tab.4). Metodika [2] uvádí přehledné schéma (**obr.5**) popisující postup posouzení dynamického chování lávky.

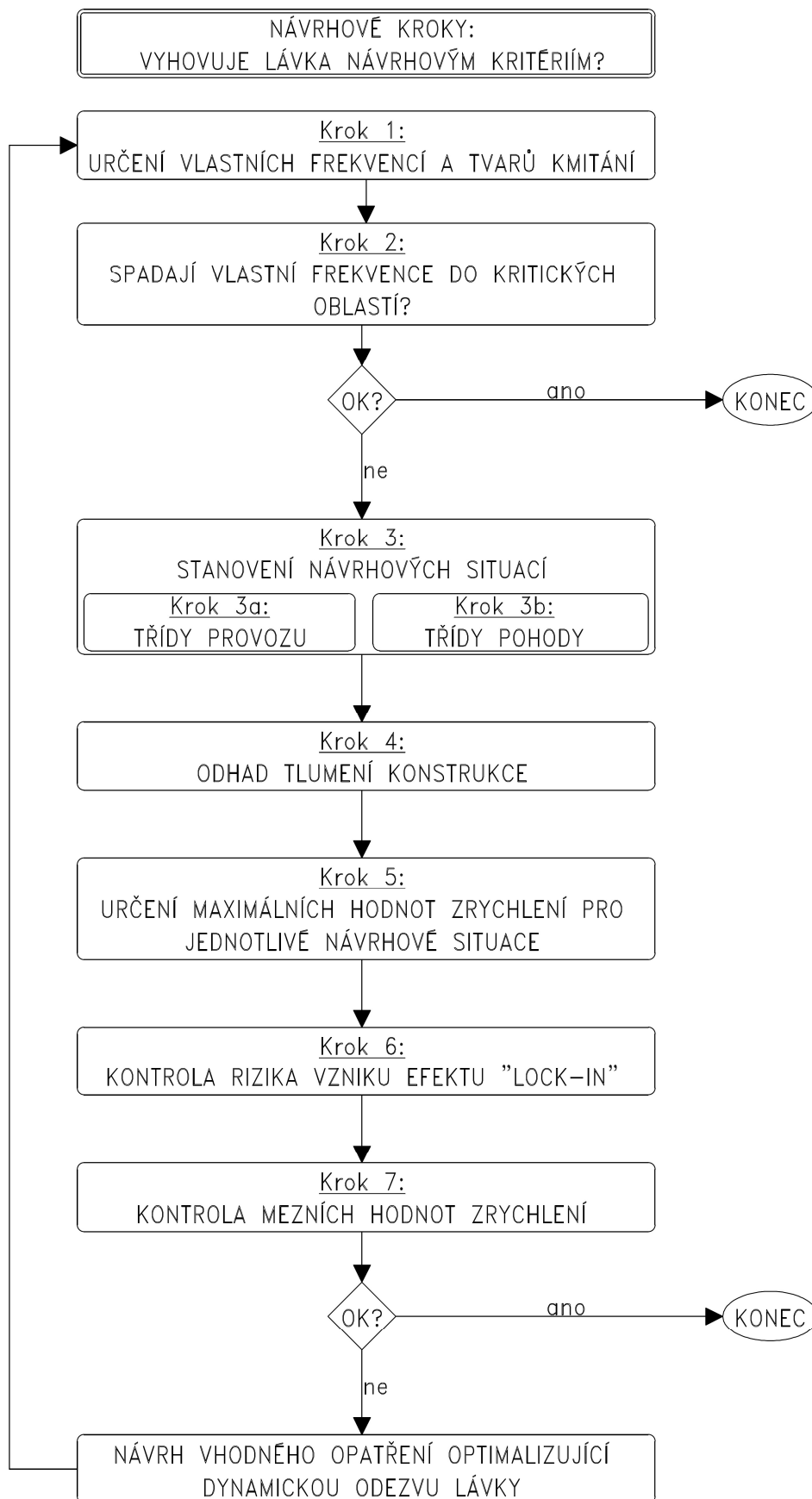
5.2.1. Krok 1: Vlastní frekvence a tvary kmitání

Výpočet vlastních frekvencí lze provést ručně, modální analýzou, na idealizovaném zjednodušeném modelu. Určení ručním výpočtem je možné provést v prvních fázích návrhu, nicméně pokud se vlastní frekvence pohybují okolo kritické oblasti frekvencí lidského kroku, je nutné určit vlastní frekvence podrobnou modální analýzou nejlépe za pomoci softwaru. Oproti výpočtu pomocí softwaru je ruční výpočet, byť na zjednodušeném modelu, nepřesným a zdlouhavým řešením.

Důležitým faktorem pro získání správných výsledků je přesnost modelu. Materiálové vlastnosti, tíha mostního vybavení a tuhosti kloubových přípojí mohou významně ovlivnit vypočítané hodnoty vlastních frekvencí. Častou a hrubou chybou je právě absence tuhosti uložení konstrukce, která často vede k naprosto nesprávným a nepoužitelným výsledkům.

POZN.: *Při výpočtu vlastních frekvencí by měla být uvážena hmota chodců pohybujících se po lávce. Metodika [2] doporučuje zavedení hmoty chodců do výpočtu, pokud jejich tíha překračuje 5% vlastní tíhy hlavní nosné konstrukce lávky. Tíha běžného chodce může být uvažována hodnotou 70 až 80 kg.*

Ke každé vlastní frekvenci musí být určen korespondující vlastní tvar kmitání. Kmitání lze rozlišit dle tvaru na svislé, podélné, příčné, torzní, či různé kombinace předešlých.



Obr. 5 Postup dynamické analýzy dle [2]

5.2.2. Krok 2: Ověření hodnot vlastních frekvencí

Kritické hodnoty vlastních frekvencí f_i [Hz] lávek z hlediska buzení provozem pěších jsou:

- pro svislé a podélné kmitání: $1,25 \leq f_i \leq 2,30$ [Hz]
- pro příčné kmitání: $0,50 \leq f_i \leq 1,20$ [Hz]

U některých nízko tlumených konstrukcí může nastat buzení i působením zatížení v druhé frekvenci lidského kroku.

- pro svislé a podélné kmitání: $2,50 \leq f_i \leq 4,60$ [Hz]

Příčné kmitání není zatížením působícím ve druhé frekvenci lidského kroku ovlivněno.

POZN.: Svislé kmitání konstrukce může být buzeno zatížením ve druhé frekvenci lidského kroku. Příklad vynucení významné odezvy lávky na zatížení v druhé frekvenci lidského kroku dosud nebyl zaznamenán.

5.2.3. Krok 3: Návrhové situace

Návrhové situace vystihují provoz na lávce dle jejího předpokládaného využití. I výjimečné situace, které nastanou maximálně jednou za dobu životnosti, by měly být popsány. Každá návrhová situace je popsána třídou provozu a třídou pohody. V ČR se stanoví návrhové situace dle tříd provozu a tříd pohody uvedených v **5.1.1.** a **5.1.2.** .

POZN.: Komfort uživatelů určují přípustné meze zrychlení. Ty má stanovit zadavatel projektu po zvážení požadavků správce a vlastníka lávky.

Následující tabulka uvádí typické návrhové situace, které mohou během doby životnosti nastat.

N	Návrhová situace	Třída provozu	Třída pohody	Pravděpodobnost výskytu
1	Otevření lávky	Hustý	Nízká	Jednou za dobu životnosti
2	Běžný provoz	Nízký	Normální	Denně
3	Víkendový provoz	Velmi nízký	Vysoký	Týdně
...				

Tab. 5 Návrhové situace

5.2.4. Krok 4: Odhad tlumení

Hodnota útlumu závisí na materiálu konstrukce a zároveň i na lokálních podmínkách podepření a celkovém uspořádání. Například osazení zábradlí a hmota pochozího povrchu lávky může způsobit dodatečný nárůst útlumu. Metodika [2] uvádí minimální a střední hodnoty poměrného útlumu ξ [-], viz **tab.6**. V dokumentu [4] je útlum definován hodnotami logaritmického dekrementu útlumu δ [-]. Rozdělení hodnot útlumu dle vlastností konstrukce v dokumentu [4] je komplexnější, rozdělení je uvedeno dle materiálu hlavní nosné konstrukce (δ_1), konstrukčního typu (δ_2) a typu uložení (δ_3). Orientační hodnoty logaritmického dekrementu útlumu lávek z [4] jsou uvedeny v **tab.8, 9** a **10**. Celkový útlum dle [4] je poté roven součtu útlumu materiálového, konstrukčního a útlumu dle typu uložení.

*POZN.: V metodice [2] jsou uvedeny i orientační hodnoty útlumu pro případ velkých výchylek kmitání. Při větších výchylkách kmitání se poměrný útlum lávky zvětšuje. Hodnoty poměrných útlumů dle konstrukčního materiálu jsou uvedeny v **tab. 7**.*

Materiál konstrukce	Poměrný útlum ξ [%]	
	Minimální hodnoty	Střední hodnoty
Železobeton	0,8	1,3
Předeptatý beton	0,5	1,0
Ocel a beton (spřažená konstrukce)	0,3	0,6
Ocel	0,2	0,4
Dřevo	1,0	1,5

Tab. 6 Poměrný útlum lávek dle použitého materiálu [2]

Materiál konstrukce	Poměrný útlum ξ [%]
Železobeton	5,0
Předeptatý beton	2,0
Ocel, svařovaná	2,0
Ocel, šroubové spoje	4,0
Ztužené plasty	7,0

Tab. 7 Poměrný útlum lávek pro velké výchylky dle [2]

Materiál konstrukce	Logaritmický dekrement útlumu δ [-]	
	Rozptyl hodnot	Střední hodnoty
Feritická ocel	0,005...0,012	0,008
Austenitická ocel	0,008...0,018	0,013
Slitina hliníku	0,010...0,025	0,015
Tvrdá dřeva	0,030...0,040	0,035
Měkká dřeva	0,040...0,050	0,045
Skelná vlákna	0,035...0,045	0,04
Železobeton bez trhlin	0,025...0,040	0,03
Železobeton s trhlinami	0,035...0,055	0,045
Předeptatý beton	0,020...0,030	0,025

Tab. 8 Materiálový útlum dle [4]

Typ konstrukce	Logaritmický dekrement útlumu δ [-]	
	Rozptyl hodnot	Střední hodnoty
Ocelová mostovka s asfaltovou vrstvou	0,020...0,030	0,025
Betonová a ocelobetonová mostovka	0,025...0,040	0,035
Dřevěná mostovka	0,030...0,050	0,050
Betonová konstrukce	0,015...0,025	0,020
Zavěšená konstrukce	0,030...0,050	0,040
Visutá konstrukce	0,025...0,035	0,030

Tab. 9 Konstrukční útlum dle [4]

Typ uložení	Logaritmický dekrement útlumu δ [-]	
	Rozptyl hodnot	Střední hodnoty
Ocelová kluzná ložiska	0,012...0,018	0,015
Válcová ložiska	0,004...0,006	0,005
Hrncová ložiska	0,008...0,012	0,010
Elastomerová ložiska	0,010...0,025	0,015

Tab. 10 Útlum dle typu uložení dle [4]

5.2.5. Krok 5: Hodnoty zrychlení při návrhových situacích

Pro vyhodnocení zrychlení vznikajícího při návrhových situacích je nutné nejprve určit zatížení působící při jednotlivých situacích.

5.2.5.1. Dynamický model zatížení

Dynamický model zatížení pro stanovení dynamické odezvy konstrukce je definován v [2]. Model zatížení je uvažován rovnoměrným harmonickým zatížením $p(t)$ [N/m²] představujícím dav n lidí rozmístěný po celé pochozí ploše lávky.

$$p(t) = P * \cos(2\pi f_s t) * n' * \psi \quad [\text{N/m}^2]$$

- P [N] síla vyvozená jedním chodcem
- f_s [Hz] frekvence lidského kroku totožná s vyšetřovanou vlastní frekvencí
- n' [m⁻²] ekvivalentní počet chodců na pochozí ploše lávky
- ψ [-] redukční koeficient zahrnující pravděpodobnost synchronizace frekvence lidského kroku s vlastní frekvencí lávky
- $P * \cos(2\pi f_s t)$ harmonické zatížení způsobené jedním chodcem

Ekvivalentní počet n' [os.] vyjadřuje počet lidí na pochozí ploše pohybujících se ve stejné frekvenci kroku. Hodnota n' se liší dle hustoty provozu d [os./m²] na lávce (pro $d < 1$ a $d \geq 1$). Očekávané varianty hustoty provozu na lávce jsou stanoveny při tvorbě návrhových situací. Hodnota ekvivalentního počtu chodců má být určena dle následujících vzorců:

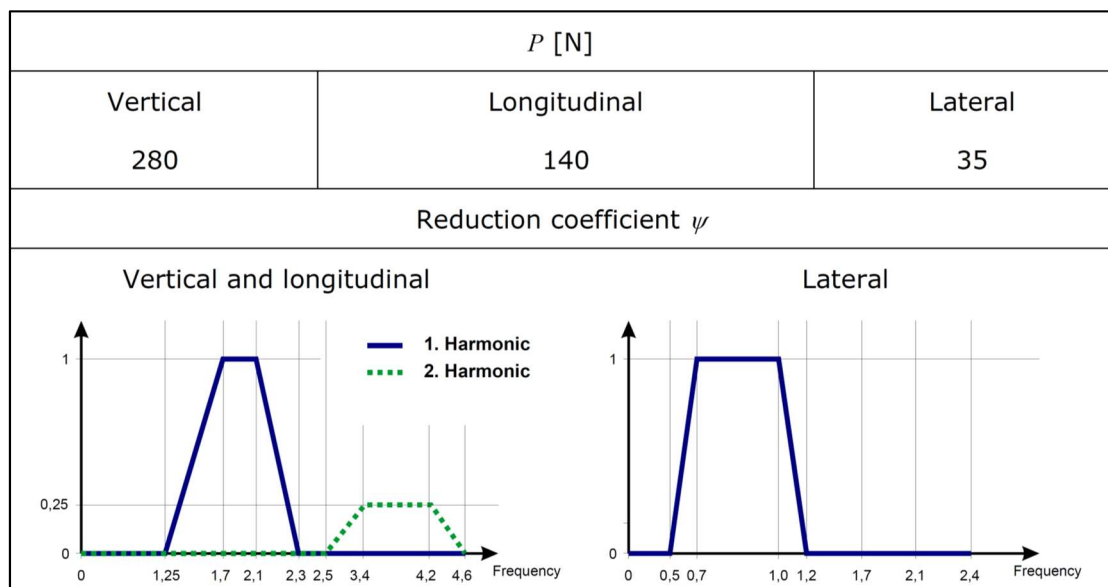
$$\text{pro } d_i < 1,0 \text{ os./m}^2 \quad n' = \frac{10,8 * \sqrt{\xi * n}}{s} \quad [\text{os./m}^2]$$

$$\text{pro } d_i \geq 1,0 \text{ os./m}^2 \quad n' = \frac{1,85 * \sqrt{n}}{s} \quad [\text{os./m}^2]$$

- ξ [-] poměrné tlumení
- $n = S * d_i$ [os.] počet osob pohybujících se na pochozí ploše lávky dle uvažované návrhové situace.
- S [m²] pochozí plocha lávky
- d_i [os./m²] hustota provozu na lávce

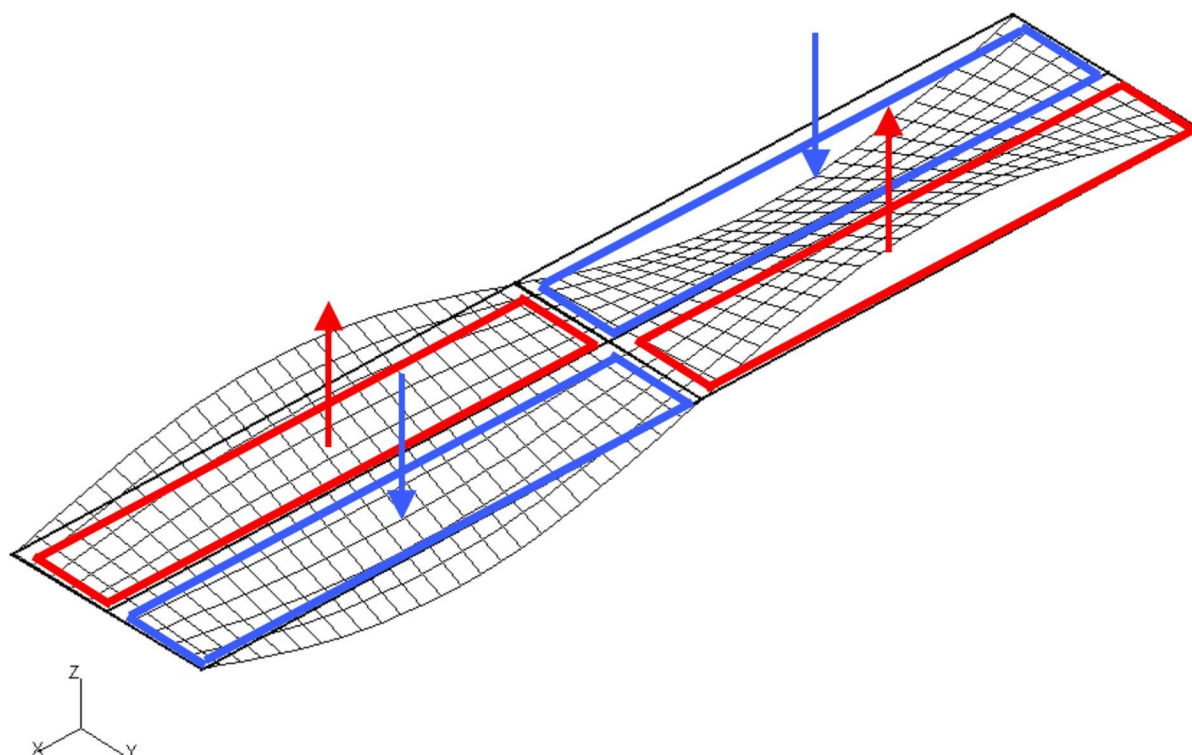
POZN.: Kromě toho, že je uvažována plná synchronizace ekvivalentního počtu chodců, je uvažováno, že chodci nejsou ovlivněni rozkmitáním. Velice pravděpodobně by po změně chování lávky již při nízkých výchylkách došlo k narušení synchronizace skupiny chodců a tím i snížení buzení kmitání.

Hodnoty sil vyvozených jedním chodcem a hodnoty redukčního součinitele jsou uvedeny na **obr.6**.

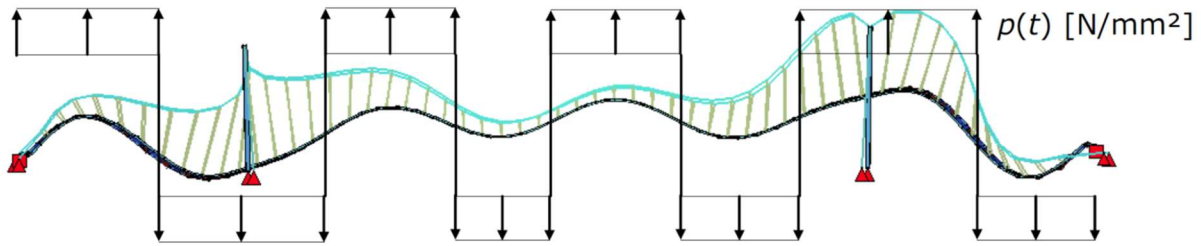


Obr. 6 Hodnoty redukčních součinitelů dle [2]

Buzení sil v jednotlivých směrech je uvažováno dle vlastních tvarů kmitání. Směr rovnoměrného harmonického zatížení $p(t)$ rozloženého na pochozí ploše lávky je vždy směrem do amplitudy kmitání, tedy nejnejpříznivěji z hlediska buzení vlastního tvaru. Správné rozložení budícího harmonického zatížení je zobrazeno na **obr.7** a **obr.8**.



Obr. 7 Rozložení harmonického zatížení pro buzení torzního tvaru kmitání z [3]

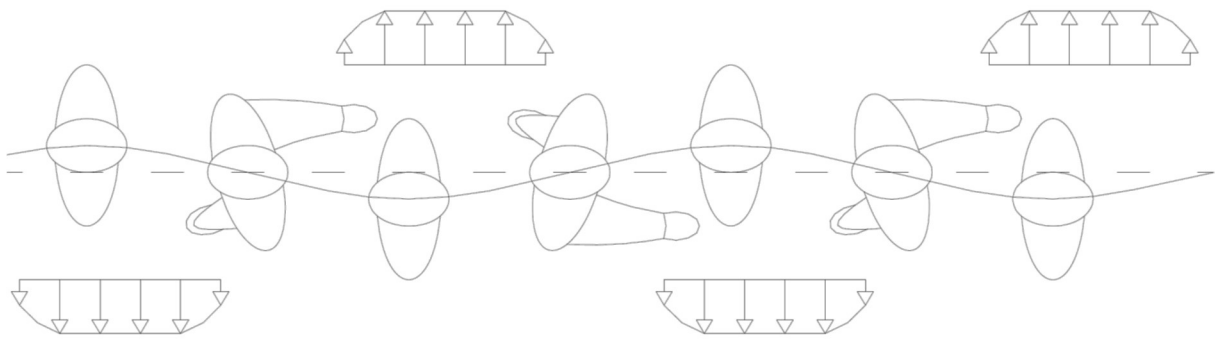


Obr. 8 Rozložení harmonického zatížení pro buzení svislého tvaru kmitání z [2]

Po zadání harmonických zatěžovacích stavů a provedení výpočtu ve vhodném výpočetním softwaru jsou zjištěny výsledné hodnoty zrychlení dosažené pro každou návrhovou situaci.

5.2.6. Krok 6: riziko vzniku efektu „Lock-in“

Při chůzi se těžiště nepohybuje pouze svisle, ale i z jedné nohy na druhou. Frekvence pohybu těžiště lidského těla je rovna polovině frekvence lidského kroku. Případ chodců synchronizujících svůj krok se svislým kmitáním lávky nebyl doposud pozorován. Na svislé kmitání je člověk schopen reagovat pokrčením nohou a tím i zajistit jakousi formu tlumení. V případě příčného kmitání konstrukce je tomu naopak. Při chůzi na příčně kmitající lávce se člověk pokouší srovnat rovnováhu pohybem ve směru výchylky lávky a tím podporuje kmitání konstrukce. Houpavý pohyb ze strany na stranu je jinak také zván „námořnická chůze“. Celý fenomén synchronizace chodce s lávkou kmitající v příčném směru se nazývá efekt „lock-in“.



Obr. 9 Schéma účinků "námořnické chůze" na pochozí plochu [2]

POZN.: Efekt „lock-in“ byl poprvé pozorován po otevření lávky Millenium bridge v Londýně, viz 6.. Na základě tohoto efektu byl most po otevření ihned uzavřen. Následná rekonstrukce trvala 2 roky.

Pro kontrolu rizika vzniku efektu „lock-in“ jsou v [2] popsány dva postupy. První postup stanovuje kritický počet chodců N_L na lávce, jejichž synchronizace může vést k vzniku „lock-in“ efektu.

$$N_L = \frac{8\pi \cdot \xi \cdot m \cdot f}{k} \quad [\text{os.}]$$

- | | | | |
|---|-------|--------|-------------------------------------|
| - | ξ | [-] | poměrné tlumení |
| - | m | [kg] | hmota konstrukce lávky |
| - | f | [Hz] | vyšetřovaná vlastní frekvence lávky |
| - | k | [Ns/m] | konstanta |

POZN.: Konstanta k byla stanovena v rámci prací na rekonstrukci lávky Millenium bridge. Konstanta platí pro vlastní frekvence příčného kmitání v oblasti 0,5 až 1,0 Hz.

Druhým možným postupem je kontrola hodnot vodorovného zrychlení při buzení příčného vlastního tvaru kmitání v jednotlivých návrhových situacích. Spouštěcí hodnota zrychlení „lock-in“ efektu byla stanovena pro oblast příčného zrychlení od 0,1 do 0,15 m/s². Pro vyloučení rizika vzniku efektu „lock-in“ je nutné zajistit, že hodnoty vodorovného příčného zrychlení nepřekročí hodnotu 0,1 m/s².

5.2.7. Krok 7: Kontrola mezních hodnot zrychlení

Vypočítané hodnoty zrychlení jsou porovnány se stanovenými návrhovými kritérii, tj. mezní hodnoty zrychlení pro jednotlivé návrhové situace a mezní hodnoty zrychlení rizika vzniku efektu „lock-in“. Při případném nedodržení návrhových kritérií musí být použito vhodné opatření pro optimalizaci dynamické odezvy lávky.

5.3. Vandalismus

Úmyslné rozkmitávání lávky skákáním, houpáním, lomcováním se zábradlím, kýváním se závěsy je vandalismus. Na lávkách může nastat situace kdy úmyslným rozkmitáním, vandalismem, dojde k poruše konstrukce lávky, případně až k havárii.

Zajímavé poznatky o úmyslném buzení mostů pro pěší jsou uvedeny v [2]. Zatímco jeden vandal dokáže vyvolat větší účinky skákáním než při pohupování se v kolenou, při synchronizaci větší skupiny houpajících se osob dojde k většímu buzení kmitání lávky než při skákání skupiny. Důvodem je snazší synchronizace více osob při houpavém pohybu, např. použitím metronomu, či držením se za ruce. Během buzení pohupováním se v kolenou navíc zůstává člověk po celou dobu v kontaktu s konstrukcí lávky a může tak lépe synchronizovat svůj pohyb s kmitající konstrukcí. Efektivita buzení však není přímo úměrná počtu vandalů. Bylo pozorováno, že zvyšující se počet členů skupiny vandalů ústí v nižší synchronizaci a tím i efektivitu buzení.

Z hlediska posouzení vandalismu je nutno prokázat, že jeho účinky nezpůsobí havárii ani poruchu části lávky. Výskyt vandalismu není uvažován jako běžné zatížení, ale mimořádné. Pro zjištění celkových účinků vandalismu na lávku má být sestavena mimořádná kombinace zatížení.

Možné důsledky vandalismu musí být dle [1] ověřeny v rámci podrobné dynamické analýzy. Dynamické modely zatížení představující vynucené kmitání způsobené vandalismem jsou uvedeny v [3] a [4].

Nejbezpečnějším postupem je použití dynamického modelu zatížení vandalismem z metodiky [3]. Dynamický model uvažuje plnou obsazenost lávky vandaly, kteří jsou přesně synchronizováni a budí některý z vlastních tvarů kmitání lávky. Omezující podmínkou je hodnota dosaženého zrychlení, při dosažení svislého zrychlení $\frac{1}{2}g$ se pohyb na kmitající konstrukci stává nemožným. V případě vodorovného zrychlení je hodnota ještě menší, a to $\frac{1}{10}g$. Proto je možné hodnotu zatížení ponížít na hodnotu potřebnou k vybudení svislého zrychlení $\frac{1}{2}g \approx 4,9 \text{ m/s}^2$ či hodnotu k vybudení vodorovného zrychlení $\frac{1}{10}g \approx 0,98 \text{ m/s}^2$ a posoudit konstrukci na toto snížené zatížení.

- Uvažováno je harmonické zatížení $p(t) = 700 * \cos(2\pi f_s t) * n' * \psi$ [N/m²] (počet vandalů na lávce $d_v=1 \text{ os./m}^2$)
- Frekvence lidského kroku všech vandalů na lávce je brána totožná s vyšetřovanou vlastní frekvencí lávky ($n' = n / S$; $\psi = 1$).

6. Opatření proti nadměrnému kmitání lávky

Jak již bylo zmíněno, nedodržení návrhových kritérií vede k upravení konstrukčního návrhu, případně i k návrhu dodatečných pohlcovačů kmitání.

Mezi vhodná opatření pro zlepšení dynamické odezvy lávky patří:

- Optimalizace hmotnosti konstrukce
- Optimalizace tuhosti konstrukce
- Optimalizace útlumu

Pro již hotový most je dodatečná instalace pohlcovače kmitání ideálním řešením. Optimalizaci konstrukce a její hmoty je vhodné provést během fáze návrhu konstrukce.

6.1. Optimalizace tíhy konstrukce

Použití těžké betonové desky mostovky může u lehkých lávek snížit dynamickou odezvu na buzení provozem pěších a cyklistů. Toto řešení je efektivní především u předpjatých mostovkových panelů typu bývalé Trojské lávky.

6.2. Optimalizace tuhosti konstrukce

Cílem zvýšením konstrukční tuhosti je obecně zvýšení hodnot vlastních frekvencí tak, aby nezasahovaly do kritické oblasti frekvencí lidského kroku. Provedení takového zásahu do stávající konstrukce je velmi nákladné, proto jsou tyto modifikace vhodné k uvážení již během fáze návrhu.

Zvýšení konstrukční tuhosti může být docíleno návrhem zábradlí jako konstrukčního prvku spolupůsobícího s celou deskou mostovky. Pro svislé kmitání je řešením zvýšení komorového nosníku, zvýšení tloušťky spodní pásnice spřažené konstrukce nebo zvýšení příhradového nosníku. Pro příčné kmitání je velice efektivním řešením rozšíření desky mostovky.

6.3. Optimalizace útlumu

Dynamická odezva lávky na zatížení může být omezena především zvýšením útlumu konstrukce. Pro již existující konstrukce je zvýšení útlumu tím nejjednodušším řešením pro omezení kmitání. Stejně tak jako je vhodným návrhem zábradlí docíleno zvýšení tuhosti, je možné návrhem zábradlí spolupůsobícího s hlavním nosným systémem docílit zvýšení útlumu. Použitím zábradlí s drátěným pletivem je útlum zvýšen také. Nevýhodou je, že přidané hodnoty útlumu nelze pro tyto prvky přesně určit, v případě drátěného pletiva je útlum závislý na velikosti amplitudy. Šroubové spoje přispívají ke zvýšení útlumu konstrukce, na rozdíl od spojů svařovaných.

Specifickými prvky zvyšujícími útlumu jsou různá externí zařízení. Nejběžnějším zařízením používaným pro zvýšení útlumu konstrukce lávky jsou viskózní tlumiče a pohlcovač kmitání, tzv. TMD.

6.3.1. Viskózní tlumič

K tlumení kinetické energie využívá viskózní tlumič deformaci kapaliny nebo pevného tělesa. Nejčastěji se jedná o píst ve válci s tekutinou. Tlak pístu způsobuje pohyb a stlačení kapaliny, při kterém se uvolňuje teplo. Účinnost tohoto tlumiče závisí na viskozitě použité kapaliny. Viskózní tlumič musí být umístěn mezi dvě místa na konstrukci.



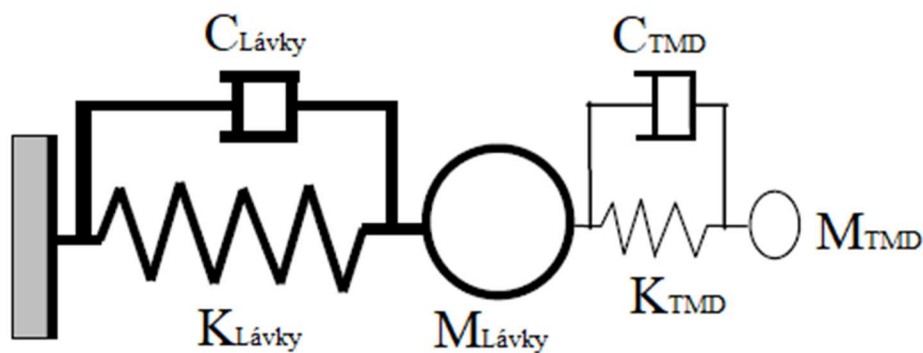
Obr. 10 Viskózní tlumiče

6.3.2. Pohlcovač kmitání TMD

TMD je zkratka pro anglické tuned mass damper. TMD je hmota připojená ke konstrukci pomocí pružiny a tlumiče. Pohlcovač je frekvenčně naladěn v blízkosti vlastní frekvence, kterou má tlumit (cca 95%). Hmotnost TMD je nepatrná ve srovnání s hmotností konstrukce, při buzení tak dochází k velkým výkmitům TMD, tím je pohlcována energie vlastního kmitání lávky. Účinkem TMD je rozdělení kritické frekvence na dvě (vyšší a nižší).



Obr. 11 TMD



Obr. 12 Schéma připojení pohlcovače kmitání k lávce

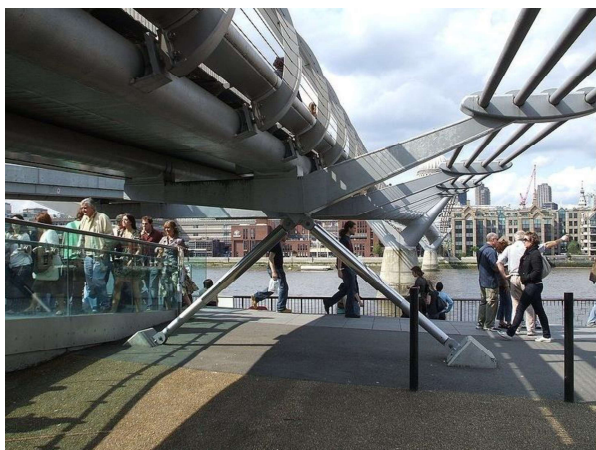
7. Příklady zajímavých konstrukcí

V této kapitole jsou uvedeny příklady konstrukcí lávek zajímavých z architektonického hlediska i z hlediska problémů s dynamickou odezvou.



Obr. 13 Visutá lávka Millenium bridge v Londýně

POZN.: Lávka o rozpětí 325m byla otevřena v roce 2000. Při otevření lávka počala kmitat v příčném směru, zhruba jedna pětina lidí z dvou tisíc návštěvníků se dostala do synchronizace ve frekvenci lávky, 0,9Hz. Most byl uzavřen, rekonstrukce trvaly 2 roky. Na lávku bylo doplněno 52 pohlcovačů kmitání TMD a 37 tlumičů.



Obr. 14 Visutá lávka Millenium bridge v Londýně



Obr. 15 Sklopná lávka Millenium bridge v Newcastlu



Obr. 16 Otočná lávka Puente de la mujer v Buenos Aires



Obr. 17 Příhradová lávka z roku 2013 v Hradci Králové



Obr. 18 Trámový most Anny Pavlovny z CFRP



Obr. 19 Oblouková lávka Lleida z GRP



Obr. 20 Extravagantní lávka Parkbrug Spoor Noord



Obr. 21 Lávka přes Labe Čelákovících – mostovka z předepjatých UHPC segmentů



Obr. 22 Lávka Sherbrook ve Francii, příhradová konstrukce z UHPC



Obr. 23 Lávka Sakata Mirai v Japonsku – hlavní NK o rozpětí 50 m z UHPC



Obr. 24 Prototyp lávky z UHPC od KŠ Prefa

8. Doplnující modely zatížení

V této kapitole jsou doplněny modely dynamického zatížení, které nejsou požadovány normou, nicméně jejich použití může být vhodné pro simulování specifických návrhových situací.

8.1. Model dynamického zatížení běžci

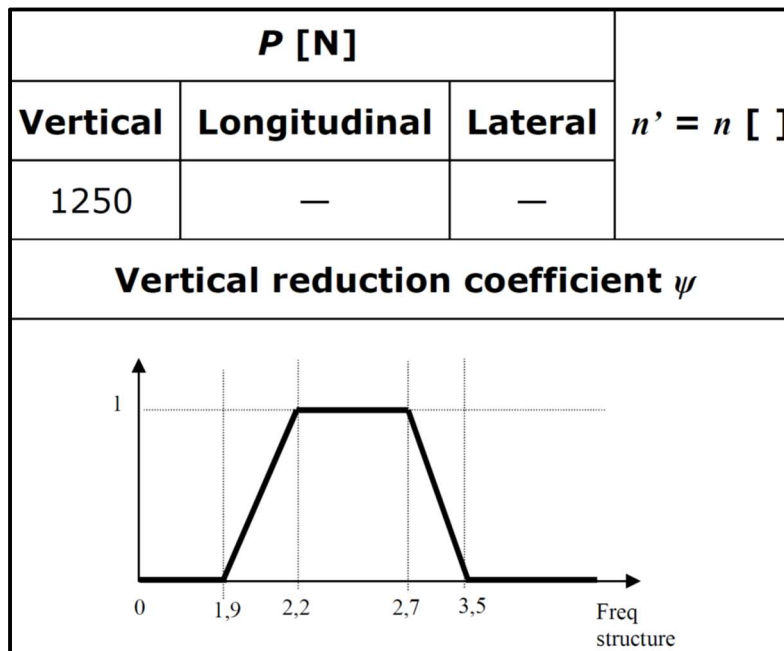
Metodika [2] popisuje nepříliš užívaný model zatížení lávky běžci. Impulzy tvořené běžci je možné rozdělit na dvě fáze, a to dopad a skok. Ve fázi skoku není běžec v kontaktu s povrchem lávky a tudíž ani nepřetěžuje lávku svojí hmotností. Ve srovnání s běžnou chůzí závisí účinky buzení běžci více na technice běhu a případně i obuvi běžců. Model dynamického zatížení běžci je definován bodovým zatížením $\mathbf{P}(\mathbf{t}, \mathbf{v})$ pohybujícím se po pochozím povrchu lávky rychlostí $\mathbf{v}$.

Vzhledem k tomu, že je model definován jako harmonické pohyblivé zatížení, je jeho modelování v běžně užívaných statických softwarech téměř nemožné.

Pohyblivé bodové zatížení $\mathbf{P}(\mathbf{t}, \mathbf{v})$ je definováno takto:

$$p(t, v) = P * \cos(2\pi f_s t) * n' * \psi \quad [\text{N/m}^2]$$

- P [N] síla vyvozená jedním běžcem
- f_s [Hz] frekvence lidského běhu totožná s vyšetřovanou vlastní frekvencí
- n' [m⁻²] ekvivalentní počet běžců na pochozí ploše lávky
- ψ [-] redukční koeficient, jehož hodnota je určena dle **obr.25**



Obr. 25 Návrhové parametry běžců

Dle [3] má být uvažována skupina n běžců v perfektní synchronizaci pohybující se ve frekvenci totožnou s vlastní frekvencí lávky a běžící rychlostí $v = 3$ m/s. Příčné účinky vznikající při běhu nebyly podrobně zkoumány, nicméně je známo, že při pohybu ve vyšší frekvenci jsou vodorovné účinky oproti svislým zanedbatelné.

POZN.: Již v metodice [3] z roku 2004 byl tento model zatížení vyhodnocen jako obecně nerozhodující.

8.2. Model zatížení jediným vandalem

V literatuře [4] je uveden model zatížení představující jedinou osobu pohybující se po konstrukci v některé z vlastních frekvencí lávky (DLM 1).

Model zatížení je definován svislou a vodorovnou silou působící v jediném bodě na lávce. Působíště těchto sil musí být zvoleno tak, aby byl vyvozen co nejnepříznivější účinek, z tohoto důvodu je běžné vytvoření několika zatěžovacích stavů se stejným zatížením, lišícím se umístěním dvojice sil.

Svislá složka síly: $Q_{pv} = 180 * \sin(2\pi f_v t)$ [N]

Vodorovná složka síly: $Q_{ph} = 70 * \sin(2\pi f_h t)$ [N]

- f_v [Hz] frekvence svislého vlastního tvaru nejbližší 2Hz
- f_h [Hz] frekvence příčného vlastního tvaru nejbližší 1Hz

8.3. Model zatížení skupinou vandalů

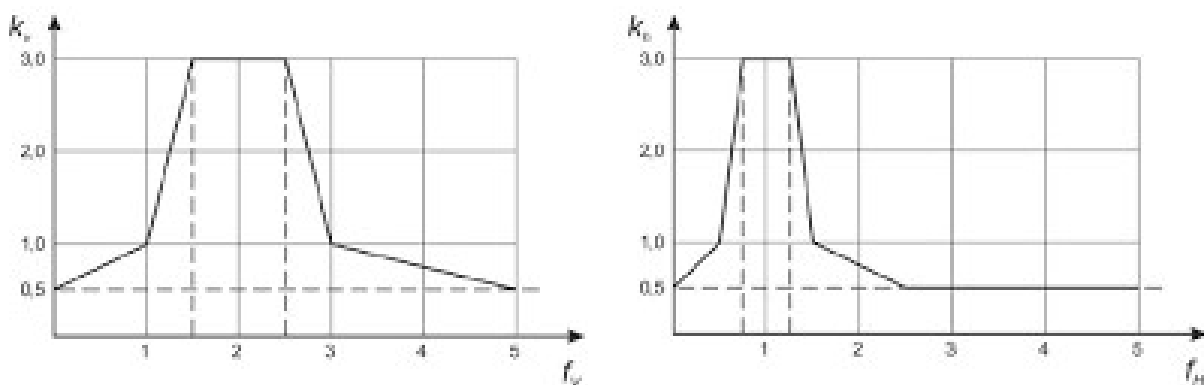
V literatuře [4] je dále uveden model zatížení představující skupinu zhruba osmi až patnácti osob pohybující se po konstrukci v některé z vlastních frekvencí lávky (DLM 2). Synchronizace pohybu vandalů s vlastní frekvencí lávky je definována pomocí koeficientů k_v a k_h .

Svislá složka síly: $Q_{gv} = 180 * k_v(f_v) * \sin(2\pi f_v t)$ [N]

Vodorovná složka síly: $Q_{gh} = 70 * k_h(f_h) * \sin(2\pi f_h t)$ [N]

- f_v [Hz] frekvence svislého vlastního tvaru nejbližší 2Hz
- f_h [Hz] frekvence příčného vlastního tvaru nejbližší 1,5Hz
- $k_v; k_h$ [Hz] koeficienty synchronizace dle **obr.26**

Model zatížení je stejně jako 8.2. definován svislou a vodorovnou silou působící v jednom bodě na konstrukci. Umístění těchto sil má být vybráno tak, aby bylo co nejnepříznivější. Pro zohlednění vlivu tíhy skupiny vandalů na vlastní frekvence lávky má být v místě působíště dvojice sil uvažována hmotnost 800kg.



Obr. 26 Hodnoty faktorů synchronizace dle vlastních frekvencí

POZN.: Metodika [4] uvádí ještě model dynamického zatížení davem lidí, tento model zatížení byl stanoven na stejném principu jako model zatížení definovaný v metodice [2]

9. Reference

- [1] ČSN EN 1991-2ed.2; ČSN EN 1991-2 Změna Z4
- [2] JRC, 2009, Design of Lightweight Bridges for Human Induced Vibrations
- [3] Sétra: Technical guide, Footbridges, Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading, 2006
- [4] Fib bulletin 32: Guidelines for the design of footbridges, 2005
- [5] *Metodika 3: Metodika pro výrobu prvků z UHPC a pro kontrolu jejich provedení.* Praha, 2014. Výstup projektu TAČR TA 010110269. Kloknerův ústav ČVUT v Praze.

V Praze dne 31.12.2018

Ing. Jakub Vůjtěch

Ing. Jan Žitný