

Dynamische belasting op tribunes



Ir. Mark Spanenburg RO
BAM Advies & Engineering

Een voorbeeld...



Inhoud

- Aanleiding
- Wat zegt de norm?
- Belastingmodel Ellis / Ji
- Belastingmodel IstructE
- Resonantie
- Conclusie

Aanleiding

- Instorting uitvak Goffert Stadion (oktober 2021):
 - Ontworpen als zit tribune (400 kg/m²).
 - Gebruikt als staan tribune → werkelijke belasting 900 kg/m² (?).
 - Door ontwerpfout 14% minder capaciteit.
 - Overmatige scheurvorming structureel genegeerd (wel gerepareerd).

Hoe werken belastingen door springende menigtes?



Wat zegt de norm?

- NEN-EN 1991-1-1, artikel 2.2 (3) & NB:2019

2.2 Gebruiksbelastingen ①

- (1) P Gebruiksbelastingen moeten zijn ingedeeld als vrije veranderlijke belastingen, tenzij in deze norm anders wordt voorgeschreven, zie EN 1990, 1.5.3 en 4.1.1.

OPMERKING

Voor gebruiksbelastingen op bruggen, zie EN 1991-2.

- (2) Bij beschouwing van buitengewone ontwerpsituaties waarbij botsing door voertuigen of buitengewone belastingen door machines van toepassing kunnen zijn, behoren deze belastingen te zijn ontleend aan EN 1991-1-7.
- (3) Gebruiksbelastingen behoren in aanmerking te zijn genomen als quasi-statische belastingen (zie EN 1990, 1.5.3.13). De belastingsmodellen mogen dynamische effecten bevatten indien er geen gevaar voor resonantie is of een andere aanzienlijke dynamische respons van de constructie, zie EN 1992 t.m. EN 1999. **Indien resonantie-effecten kunnen worden verwacht, als gevolg van synchroon ritmische beweging van mensen of door dansen of springen, behoort het belastingsmodel te zijn vastgesteld voor een gespecialiseerde dynamische berekening (volledig dynamische berekening).**

OPMERKING

De te gebruiken berekeningswijze kan in de nationale bijlage zijn opgenomen.

Een volledig dynamische berekening is niet vereist voor:

a) met betrekking tot de uiterste grenstoestand:

- relatief kleine constructiedelen met weinig demping en belast door ten hoogste 10 personen waarvoor de eigen frequentie niet kleiner is dan 8 Hz en bovendien is gerekend met een naar boven gerichte belasting van 50 % van de neerwaarts gerichte gebruiksbelasting;

b) met betrekking tot de bruikbaarheidsgrenstoestand:

- vloeren in woningen, kantoren e.d. waarvan de laagste eigen frequentie niet kleiner is dan 3 Hz of de representatieve waarden van het eigen gewicht en de quasi-blijvende belasting groter zijn dan 5 kN/m² of 150 kN totaal per ligger;
- vloeren belast door dansen of springen, waarvoor de laagste eigen frequentie niet kleiner is dan 5 Hz.

N-EN 1991-1-1+C1+C11:2019/NB:2019

Klasse van belast oppervlak	q_k kN/m ²	Q_k^b kN
Klasse C (bijeekomruimten)		
C-omsloten afzonderlijke verkeersruimte, niet horend bij C5	5	3
C1-tafels	4,0 ^a	3
C2-vaste zitplaatsen	4,0 ^{a,c}	7 ^a
C3-zonder obstakels voor rondlopende mensen	5,0	7
C4-fysieke activiteiten	5,0	7
C5-grote mensenmassa's	5,0 ^d	7
Klasse D (winkelruimten)		
D-omsloten verkeersruimten	4,0	7
D1-kleinhandel	4,0	7
D2-warenhuizen	4,0	7
^a Voor ruimten met uitsluitend een onderwijsfunctie waar les wordt gegeven, volstaat een vloerbelasting q_k van 2,5 kN/m ² en Q_k van 3 kN. ^b Tenzij anders vermeld, zijn de afmetingen van de puntlast gelijk aan 0,1 m × 0,1 m. ^c Afmetingen puntlast gelijk aan 0,5 m × 0,5 m. ^d Bij tribunes moet bovendien rekening zijn gehouden met een gelijkmatig verdeelde opwaartse gebruiksbelasting gelijk aan 50 % van de neerwaarts gerichte gebruiksbelasting. Deze belasting brengt het dynamisch effect in rekening dat kan optreden als gevolg van de bewegende massa van mensen (opspringen). De neerwaartse en opwaartse gebruiksbelastingen moeten afzonderlijk als extreme veranderlijke belasting worden beschouwd. Tevens moet bij de neerwaartse gebruiksbelasting op tribunes gelijktijdig rekening zijn gehouden met een veranderlijke gelijkmatig verdeelde horizontale belasting die kan optreden als gevolg van de bewegende mensenmassa. Deze horizontale belasting bedraagt 10 % van de verticale belasting en moet wat betreft de richting zijn beschouwd als een vrije belasting. Door het in rekening brengen van de opwaartse en gelijkmatige verdeelde horizontale belasting als statische belasting wordt voorkomen dat voor tribunes dynamische berekeningen moeten worden gemaakt om het effect van een bewegende mensenmassa te bepalen op de sterkte van de tribune.		
OPMERKING 1 Afhankelijk van het te verwachten gebruik, mogen ruimten die doorgaans worden ingedeeld bij C2, C3, C4, zijn ingedeeld bij C5 door een beslissing van de opdrachtgever.		
OPMERKING 2 Onderverdelingen zijn gegeven voor A, B, C1 tot C5, D1 en D2.		
OPMERKING 3 Zie 6.3.2 voor opslag of industrieel gebruik.		

Belastingmodellen

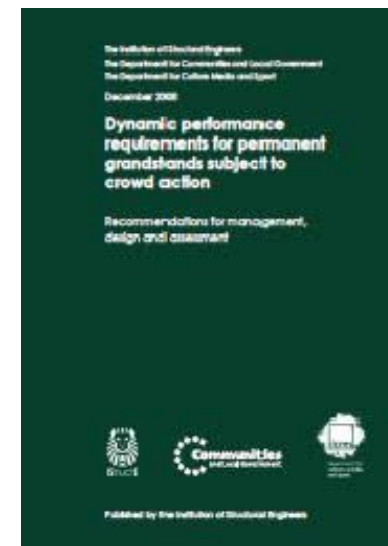
Algemeen

Belastingmodellen

Overzicht

Ellis / Ji

IStructE



Belastingmodellen

Basisprincipe

- Aantal personen per m² n
- Gemiddelde gewicht van een persoon G (vaak 80 kg)
- Impactfactor activiteit: $k_p = F/G$
- Resonantie constructie: DAF

$$p_k = n \times G \times k_p \times DAF$$

Belastingmodel Ellis / Ji

1 Persoon

Belastingmodel Ellis / Ji

Belasting door 1 persoon

- Basis voor SBR-richtlijn en British Standard
- Verschillende activiteiten, uitgedrukt in een fourierreeks:

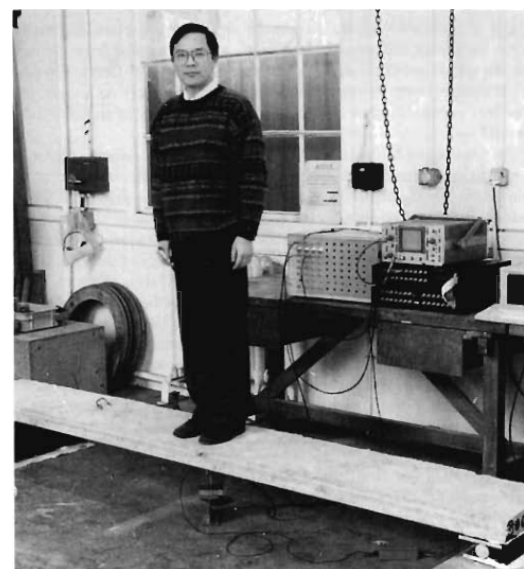
$$F_p(t) = G(1 + \sum \alpha_n \sin(2\pi n f_p t + \phi_n))$$

- Fourier coëfficiënten o.b.v. experimenten

Tabel 6. Coëfficiënten voor α_n en ϕ_n voor verschillende activiteiten.

activiteit		harmonische					
		n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5	n = 6
low-impact aerobics	α_n	1,286	0,164	0,133	0,036	0,023	0,032
	ϕ_n	$-\pi/6$	$\pi/6$	$-\pi/2$	$-\pi/6$	$\pi/5$	$-\pi/2$
high-impact aerobics	α_n	1,570	0,667	0,000	0,133	0,030	0,057
	ϕ_n	0	$-\pi/2$	0	$-\pi/2$	0	$-\pi/2$
gewoon springen	α_n	1,800	1,286	0,667	0,164	0,039	0,133
	ϕ_n	$\pi/6$	$-\pi/6$	$-\pi/2$	$\pi/6$	$-\pi/6$	$-\pi/2$
hoog springen	α_n	1,886	1,571	1,132	0,667	0,259	0,000
	ϕ_n	$\pi/4$	0	$-\pi/4$	$-\pi/2$	$\pi/4$	0

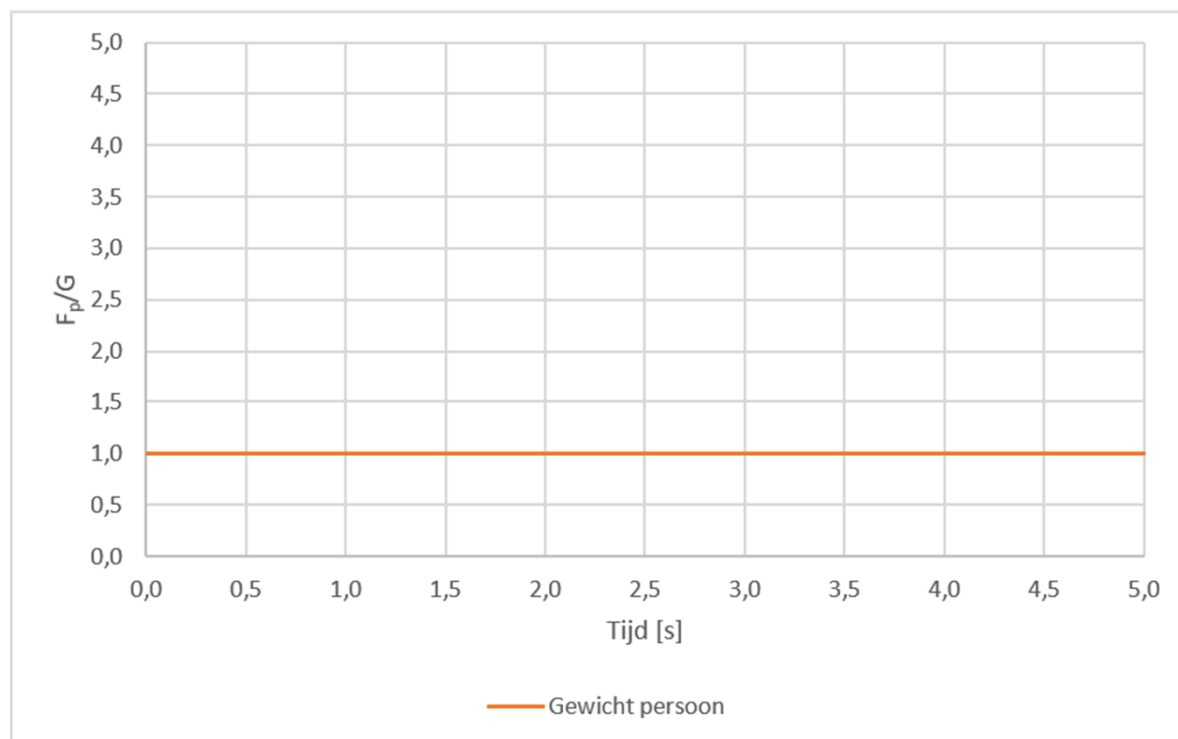
Bron: SBR richtlijn trillingen van vloeren door lopen



Belastingmodel Ellis / Ji

Belasting door 1 persoon

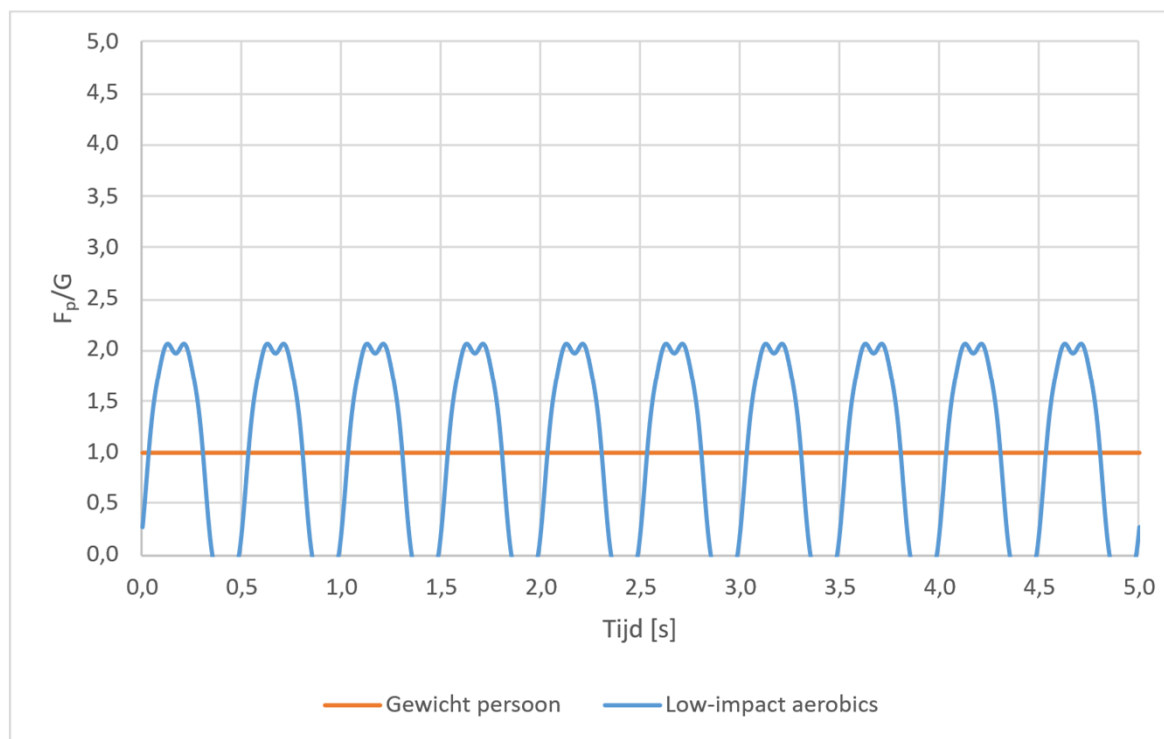
Statisch gewicht



Belastingmodel Ellis / Ji

Belasting door 1 persoon

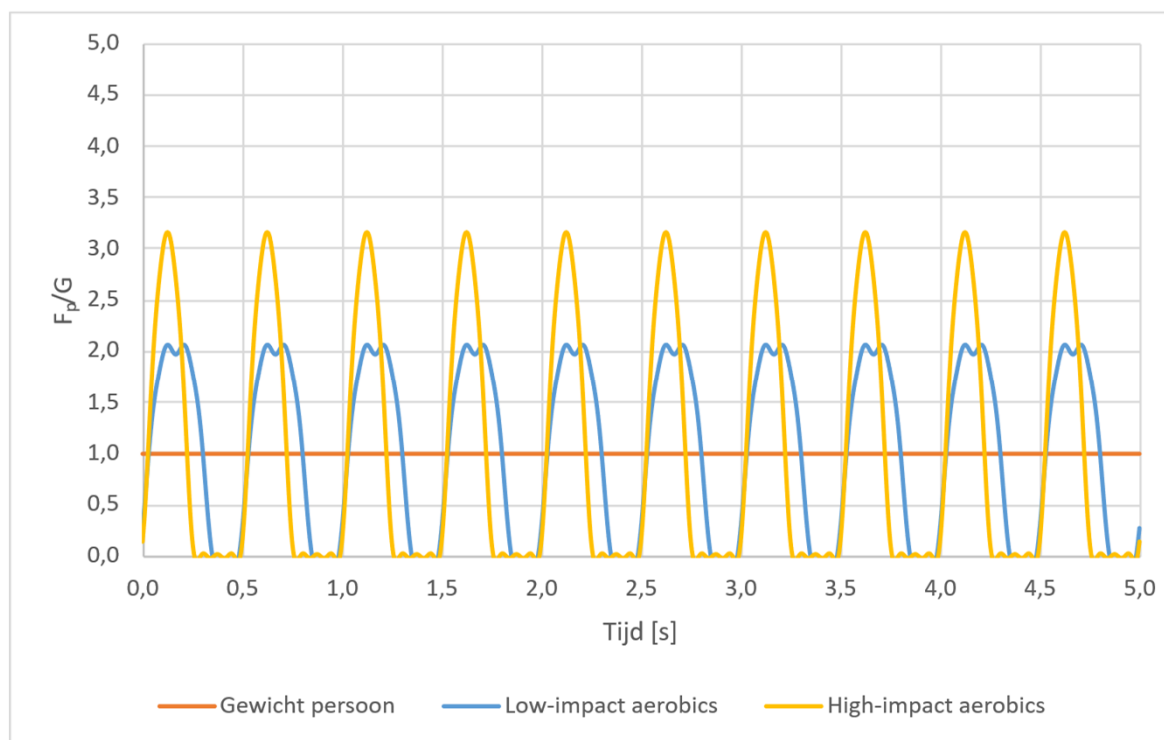
Low-impact aerobics, sprongfrequentie 2 Hz



Belastingmodel Ellis / Ji

Belasting door 1 persoon

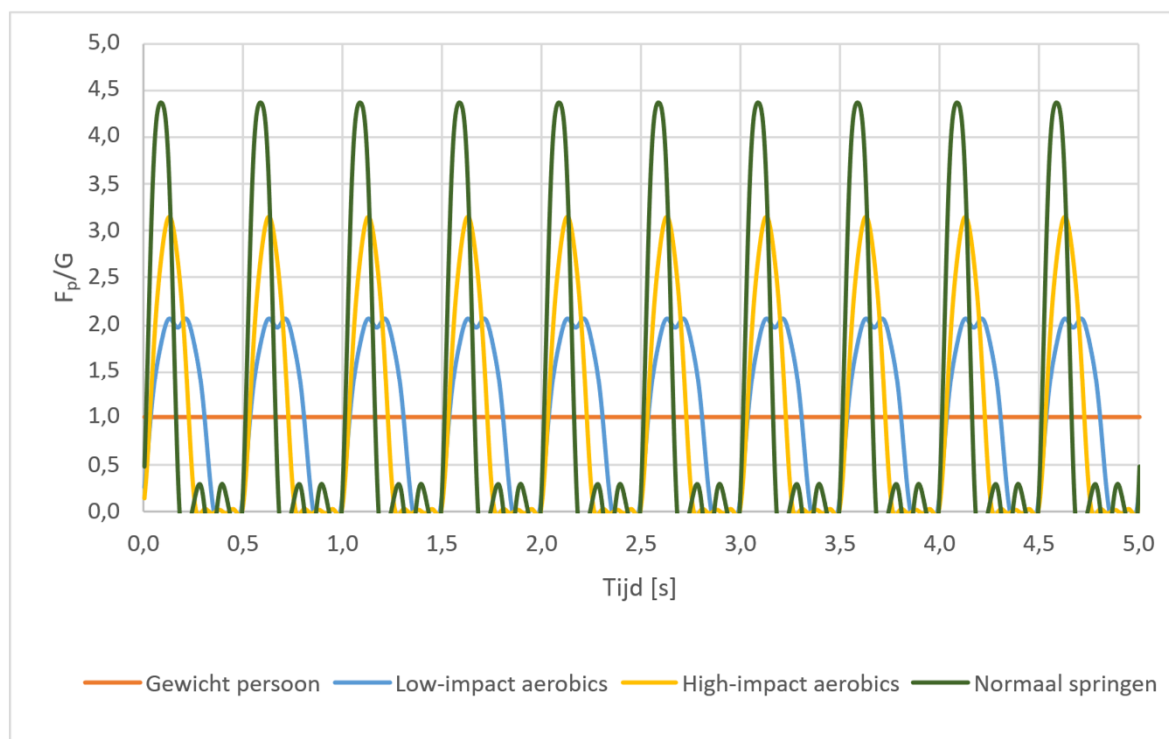
High impact aerobics, sprongfrequentie 2 Hz



Belastingmodel Ellis / Ji

Belasting door 1 persoon

Normaal springen, sprongfrequentie 2 Hz



Belastingmodel Ellis / Ji

Conclusie (1 persoon)

- Statische gewicht neemt aanzienlijk toe
- Toename is afhankelijk van de activiteit
- Toename gewicht is ongeveer factor 2,0 - 4,5

Belastingmodel Ellis / Ji

Groepseffecten

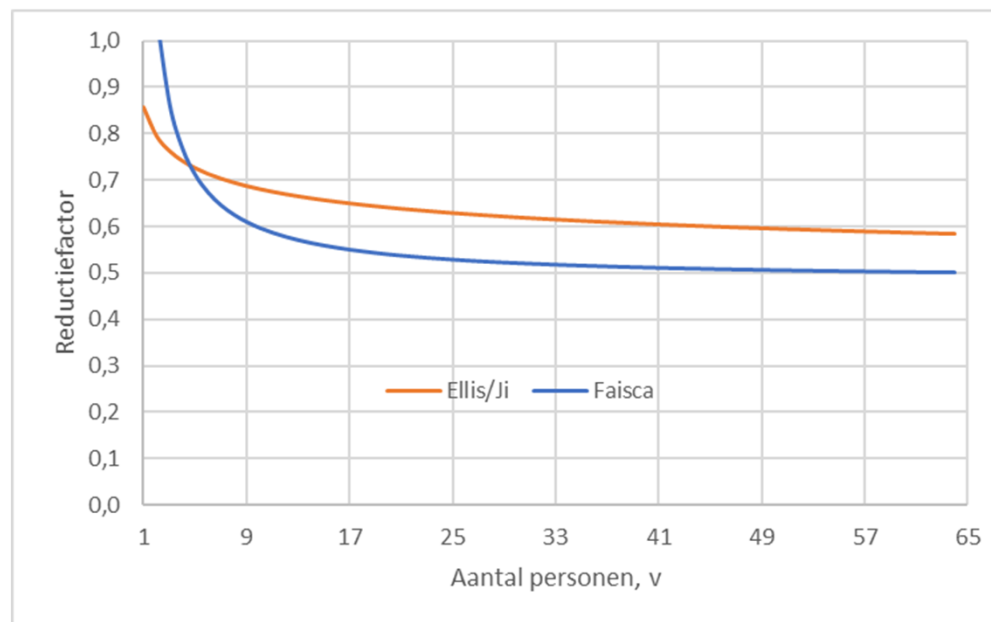
Belastingmodel Ellis / Ji

Groepseffect

- Mensen springen nooit exact tegelijk
- Ellis / Ji experimenteel onderzoek tot maximaal 64 personen; **reductie ~30-40%.**
- Faisca ook onderzoek gedaan t.b.v. vandalisme bij bruggen; **reductie ~40-50%.**
- Coördinatie erg belangrijk (Ellis / Ji gebruikten muziek, Faisca niet bekend)!!



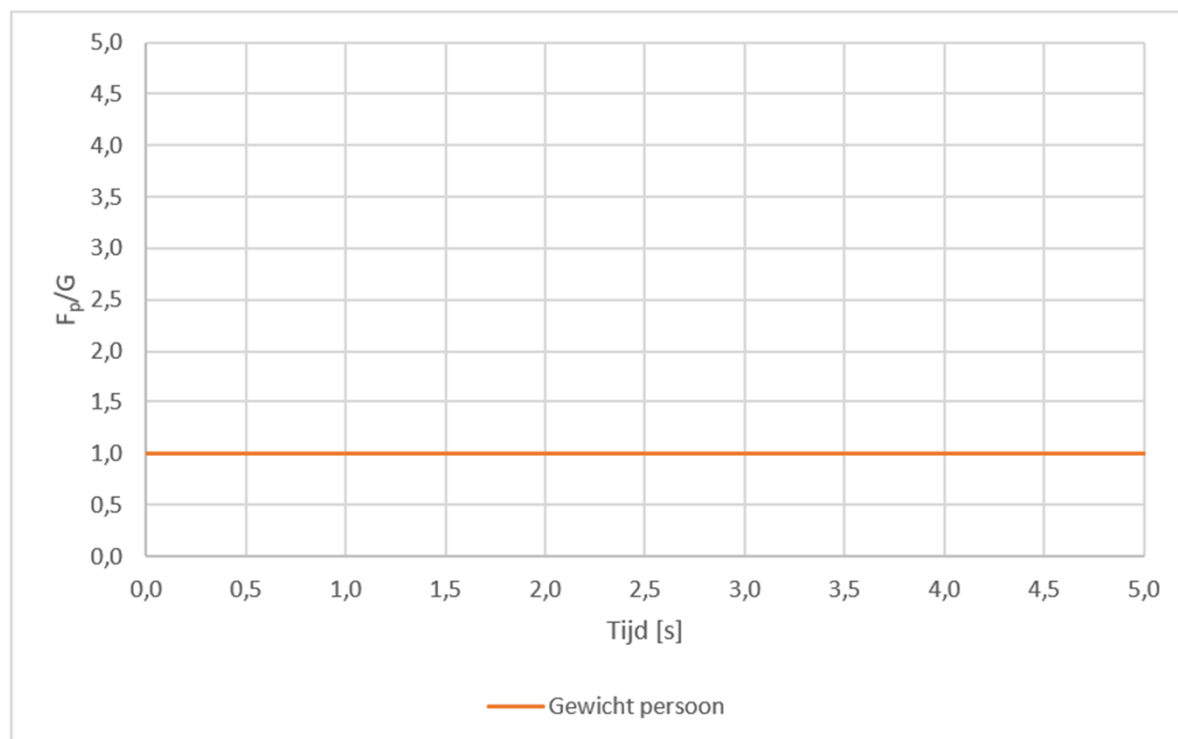
Figure 3: Two test subjects jumping together on the slab strip.



Belastingmodel Ellis / Ji

Groepseffect

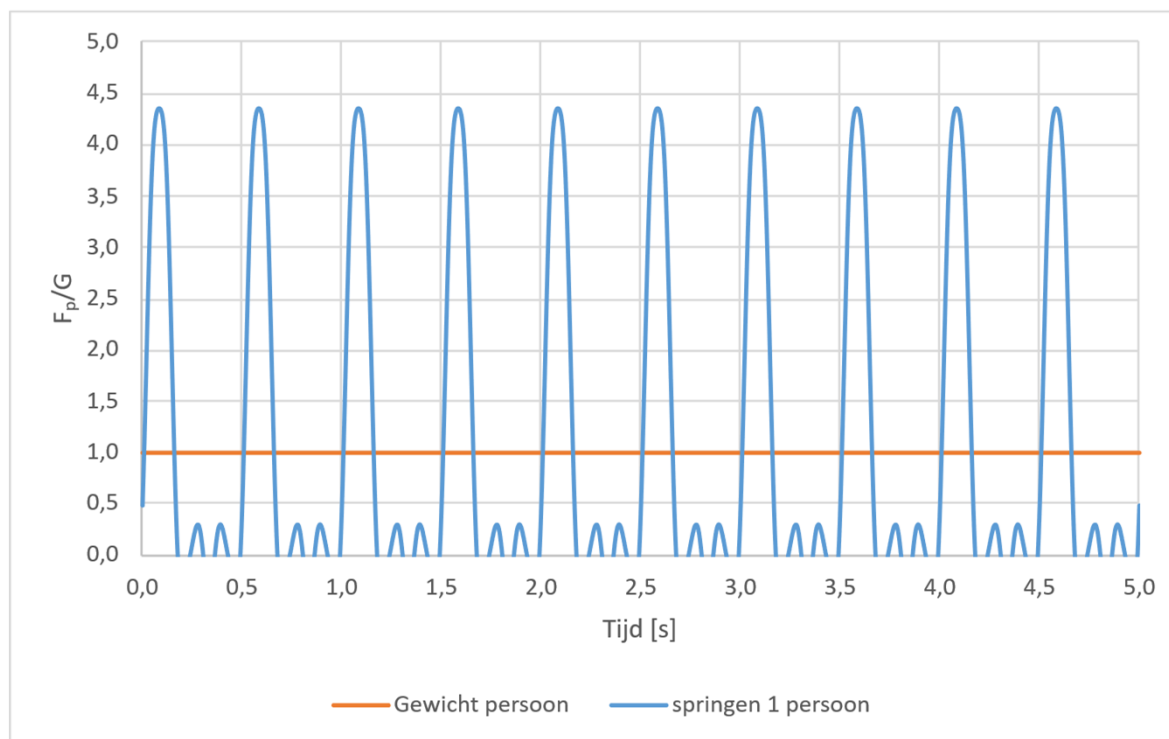
Statisch gewicht van een persoon of groep



Belastingmodel Ellis / Ji

Groepseffect

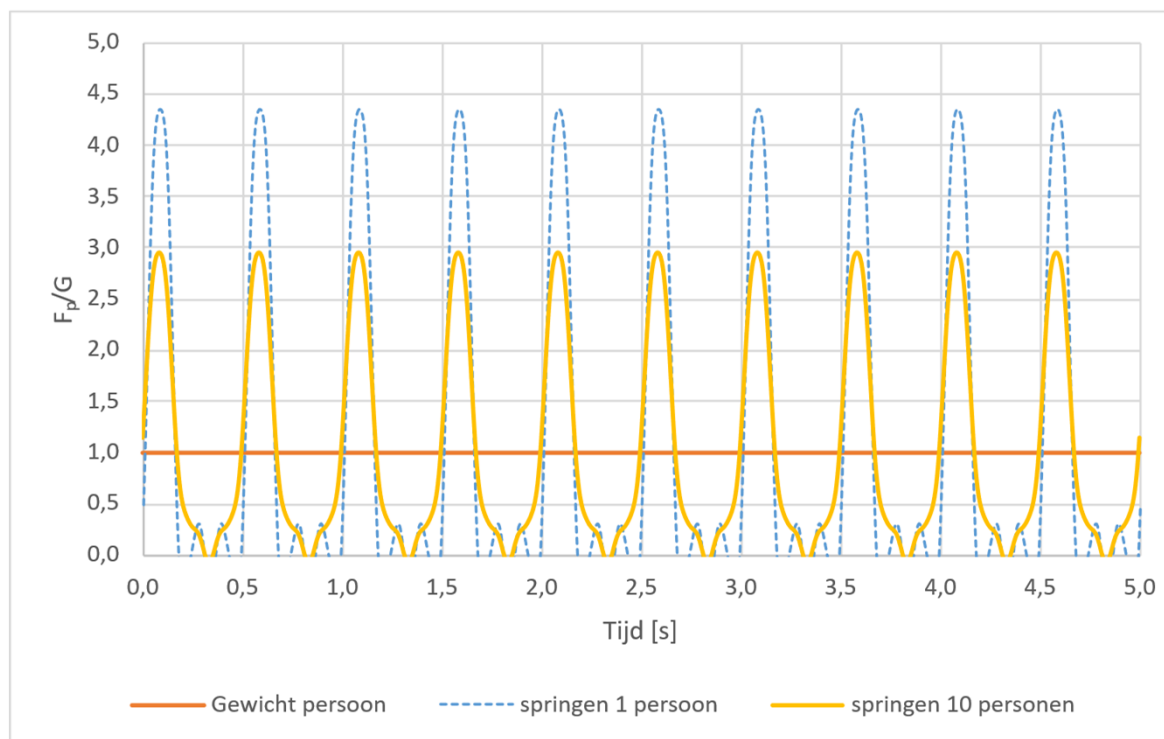
Normaal springen, 1 persoon, sprongfrequentie 2 Hz



Belastingmodel Ellis / Ji

Groepseffect

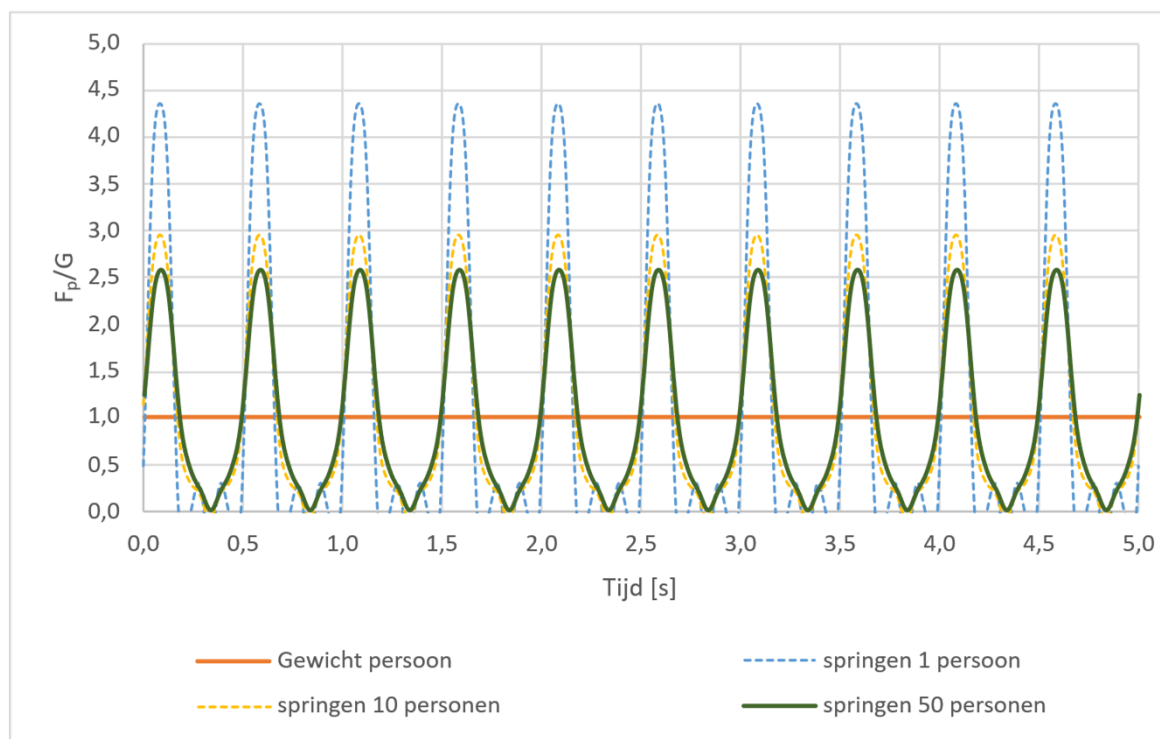
Normaal springen, **10 personen**, sprongfrequentie 2 Hz



Belastingmodel Ellis / Ji

Groepseffect

Normaal springen, **50 personen**, sprongfrequentie 2 Hz



Belastingmodel Ellis / Ji

Conclusie (groepen)

- Groepseffect reduceert de impactfactor F/G van 4,5 naar 2,5!

Sprongfrequentie

- 1,5 – 3,5 Hz voor een individueel persoon
- 1,5 – 2,8 Hz voor kleine groep met enige coördinatie (aerobics)
- 1,8 – 2,3 Hz voor grote groep springende personen met enige coördinatie (popconcert)

**Sprongfrequentie heeft geen invloed op de grootte van de belasting bij het model van Ellis / Ji.
Dat is op zich wel vreemd.**

Belastingmodel IStructE

Belastingmodel IStructE

Beschrijving event scenarios

Table 1 Event Scenarios to be supplemented with a statement on agreed operational arrangements						
Scenario	Exemplar event	Crowd behaviour	Management		Acceptance criteria	
			Expected crowd make up	Stewarding	Crowd expectation	Natural frequency or design acceleration limit
1	Stand used for viewing of sporting and similar events with less than maximum attendance	Normally relaxed viewing public with spontaneous response to single events	Predominantly seated	Stewards require to be instructed as to the possible effects of motion of the structure resulting from coordinated crowd activity and, particularly for Scenarios 3 and 4, need to be provided with the means for instant communication with central control.	Comfort	Route 1 with 3.5 Hz min. or accepted at the discretion of a Listed Engineer
2	Classical concert and typical well attended sporting event	Audience seated with only few exceptions – minor excitation	Predominantly seated		Comfort	Route 1 with 3.5 Hz min. Is normally adequate but otherwise Route 2 and 3%g max. RMS acceleration
3	Commonly occurring events including, inter alia, high profile sporting events and concerts with medium tempo music and revival pop-concerts with cross generation appeal	Potentially excitable crowd with crowd participation	All standing and participating during some part of the programme		A few individuals may complain at lack of comfort but most will tolerate the motion	Route 1 with 6 Hz min. Otherwise Route 2, and 7½%g max. RMS acceleration
4	More extreme events including high energy concerts with periods of high intensity music	Excited crowd, mostly standing and bobbing with some jumping	Mainly young and active with vigorous participation		Excitement and motion but with expectation of personal safety	Route 1 with 6 Hz min. Otherwise Route 2, and 20%g max. RMS acceleration

Note
Appendix 1, Section A1.5 deals with Root Mean Square (RMS) accelerations and how these are defined and used in analysis.

Belastingmodel IStructE

Beschrijving event scenarios

Table 1 Event Scenarios to be supplemented with a statement on agreed operational arrangements						
Scenario	Exemplar event	Crowd behaviour	Management		Acceptance criteria	
			Expected crowd make up	Stewarding	Crowd expectation	Natural frequency or design acceleration limit
1	Stand used for viewing of sporting and similar events with less than maximum attendance	Normally relaxed viewing public with spontaneous response to single events	Predominantly seated	Stewards require to be instructed as to the possible effects of motion of the structure resulting	Comfort	Route 1 with 3.5 Hz min. or accepted at the discretion of a Listed Engineer
2	Classical concert and typical well attended sporting event	Audience seated with only few exceptions – minor excitation	Predominantly seated	from coordinated crowd activity and, particularly for Scenarios 3 and 4, need to be provided with the means for instant communication with central control	Comfort	Route 1 with 3.5 Hz min. is normally adequate but otherwise Route 2 and 3%g max. RMS acceleration
3	Commonly occurring events including, inter alia, high profile sporting events and concerts with medium tempo music and revival pop-concerts with cross generation appeal	Potentially excitable crowd with crowd participation	All standing and participating during some part of the programme		A few individuals may complain at lack of comfort but most will tolerate the motion	Route 1 with 6 Hz min. Otherwise Route 2, and 7½%g max. RMS acceleration
4	More extreme events including high energy concerts with periods of high intensity music	Excited crowd, mostly standing and bobbing with some jumping	Mainly young and active with vigorous participation		Excitement and motion but with expectation of personal safety	Route 1 with 6 Hz min. Otherwise Route 2, and 20%g max. RMS acceleration
Note Appendix 1, Section A1.5 deals with Root Mean Square (RMS) accelerations and how these are defined and used in analysis.						

Belastingmodel IStructE

Beschrijving event scenarios

Table 1 Event Scenarios to be supplemented with a statement on agreed operational arrangements						
Scenario	Exemplar event	Crowd behaviour	Management		Acceptance criteria	
			Expected crowd make up	Stewarding	Crowd expectation	Natural frequency or design acceleration limit
1	Stand used for viewing of sporting and similar events with less than maximum attendance	Normally relaxed viewing public with spontaneous response to single events	Predominantly seated	Stewards require to be instructed as to the possible effects of motion of the structure resulting from coordinated crowd activity and, particularly for Scenarios 3 and 4, need to be provided with the means for instant communication with central control.	Comfort	Route 1 with 3.5 Hz min. or accepted at the discretion of a Listed Engineer
2	Classical concert and typical well attended sporting event	Audience seated with only few exceptions – minor excitation	Predominantly seated		Comfort	Route 1 with 3.5 Hz min. is normally adequate but otherwise Route 2 and 3%g max. RMS acceleration
3	Commonly occurring events including, inter alia, high profile sporting events and concerts with medium tempo music and revival pop-concerts with cross generation appeal	Potentially excitable crowd with crowd participation	All standing and participating during some part of the programme		A few individuals may complain at lack of comfort but most will tolerate the motion	Route 1 with 6 Hz min. Otherwise Route 2, and 7%g max. RMS acceleration
4	More extreme events including high energy concerts with periods of high intensity music	Excited crowd, mostly standing and bobbing with some jumping	Mainly young and active with vigorous participation		Excitement and motion but with expectation of personal safety	Route 1 with 6 Hz min. Otherwise Route 2, and 20%g max. RMS acceleration
Note Appendix 1, Section A1.5 deals with Root Mean Square (RMS) accelerations and how these are defined and used in analysis.						

Belastingmodel IStructE

Beschrijving event scenarios

Table 1 Event Scenarios to be supplemented with a statement on agreed operational arrangements						
Scenario	Exemplar event	Crowd behaviour	Management		Acceptance criteria	
			Expected crowd make up	Stewarding	Crowd expectation	Natural frequency or design acceleration limit
1	Stand used for viewing of sporting and similar events with less than maximum attendance	Normally relaxed viewing public with spontaneous response to single events	Predominantly seated	Stewards require to be instructed as to the possible effects of motion of the structure resulting from coordinated crowd activity and, particularly for Scenarios 3 and 4, need to be provided with the means for instant communication with central control.	Comfort	Route 1 with 3.5 Hz min. or accepted at the discretion of a Listed Engineer
2	Classical concert and typical well attended sporting event	Audience seated with only few exceptions – minor excitation	Predominantly seated		Comfort	Route 1 with 3.5 Hz min. is normally adequate but otherwise Route 2 and 3%g max. RMS acceleration
3	Commonly occurring events including, inter alia, high profile sporting events and concerts with medium tempo music and revival pop-concerts with cross generation appeal	Potentially excitable crowd with crowd participation	All standing and participating during some part of the programme		A few individuals may complain at lack of comfort but most will tolerate the motion	Route 1 with 6 Hz min. Otherwise Route 2, and 7%g max. RMS acceleration
4	More extreme events including high energy concerts with periods of high intensity music	Excited crowd, mostly standing and bobbing with some jumping	Mainly young and active with vigorous participation		Excitement and motion but with expectation of personal safety	Route 1 with 6 Hz min. Otherwise Route 2, and 20%g max. RMS acceleration
Note Appendix 1, Section A1.5 deals with Root Mean Square (RMS) accelerations and how these are defined and used in analysis.						

Belastingmodel IStructE

High intensity concert (scenario 4)



Stufib – Tribune belasting

Belastingmodel IStructE

Beschrijving belasting

- Belasting is (wederom) Fourierreeks:

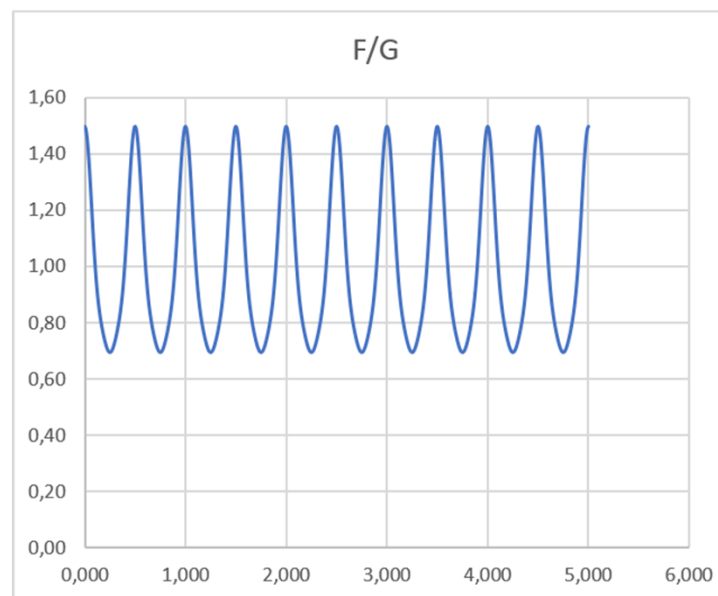
$$F_p(t) = mg(1 + \rho \sum G_i \cos(2\pi i f t + \theta_n))$$

- Belasting geldt voor een deinende menigte van 50 personen
- Verhouding scenario 4: $F/G = 1,5$
- Ellis / Ji, springen 50 personen: $F/G = 2,5$

Table A2.2 Recommended values of the Generated Load Factors, G_i , for use in calculations of performance for design or assessment.

Scenario	Harmonic number			Typical activity represented	Effectiveness factor
	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$		
1	-----	-----	-----	Not required. Route 1 only, but with discretion available by Listed Engineer (Recommendations Table 1)	Not required.
2	0.12	0.015	Zero	Predominantly seated with occasional coordinated rhythmic movement from standing people	Eqn. A2.3
3	0.188	0.047	0.013	All crowd considered active. Moderate bobbing at three quarters Parkhouse and Ewins' 50 person level	Eqn. A2.3
4	0.375	0.095	0.026	The whole crowd active. Loading taken to be twice that for the commonly occurring events of Scenario 3	Eqn. A2.2

Bron: Dynamic performance requirements for permanent grandstands subject to crowd action



Welk belastingmodel?

Springen of een energiek concert?



High intensity concert
(scenario 4 – IstructE)



Synchron springen
(Ellis / Ji)

Vertaling naar gebruiksbelastingen

Belastingen

Voorbeelden op starre ondergrond:

Dynamische belasting: $p_k = n \cdot G \cdot k_p$

Activiteit	Type plaats	Model	n [p/m ²]	G (kN)	k _p (=F _p /G)	p _k [kN/m ²]	Norm?
Aerobics		Ellis/Ji	0,25	0,80	3,0	0,6	5,0 (C4)
Popconcert	Zitplaatsen	IStructE	2,5	0,80	1,5	3,0	4,0 (C2)
	Staanplaats	IStructE	4,0	0,80	1,5	4,8	5,0 (C5)
Springen	Zitplaatsen	Ellis/Ji	2,5	0,80	2,5	5,0	4,0 (C2)
	Staanplaats	Ellis/Ji	4,0	0,80	2,5	8,0	5,0 (C5)

Dit is exclusief:

- Ophoping (ook mogelijk bij zitplaatsen – staan op stoeltjes)
- **Resonantie** effecten constructie!!

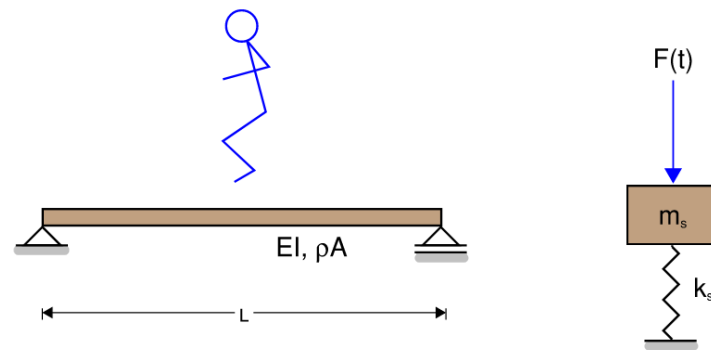
land	gebruiksklasse	belasting [kN/m ²]
Groot-Brittannië	C5-grote mensen massa's	5,0
	C52-Podia	7,5
Verenigde Staten	podia	7,2
Italië	C5-Grote mensen massa's	5,0
Duitsland	vaste zitplaatsen	5,0
	zonder vaste zitplaatsen	7,5
Nederland	C5-grote mensen massa's	5,0
	C2-vaste zitplaatsen	4,0

Resonantie effecten van de constructie

Resonantie

Eigenfrequentie

- Resonantie hangt af van de eigenfrequentie van een **lege** tribune
- Eigenfrequentie wordt bepaald door de massa en buigstijfheid van de lege tribune
- Aanname: lineair elastisch gedrag

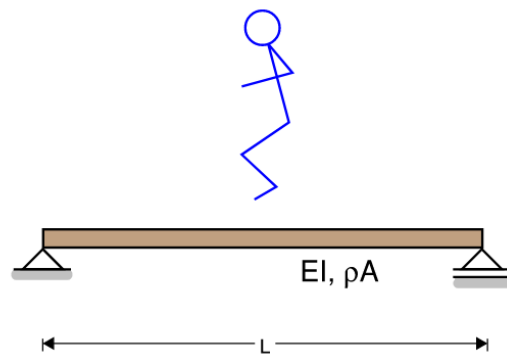


$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_s}{m_s}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}}$$

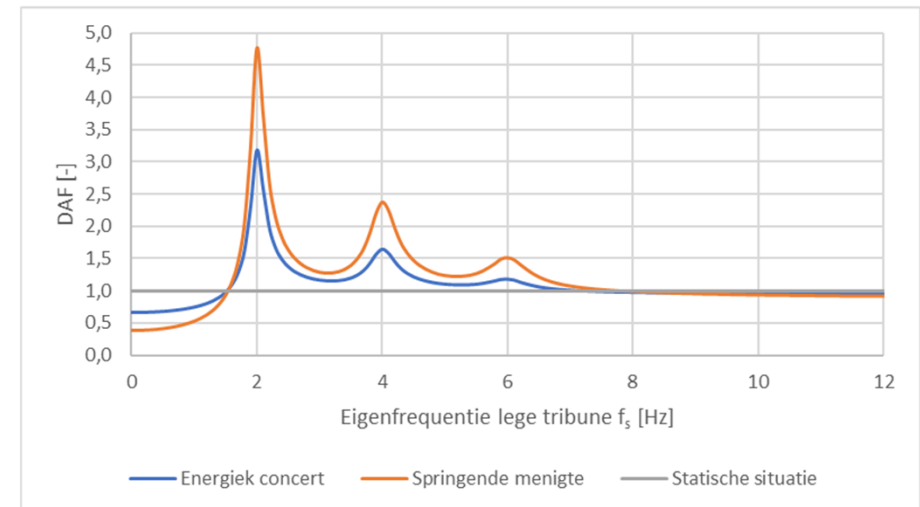
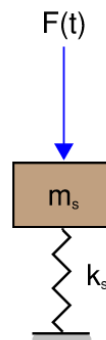
Resonantie

Dynamische Amplificatie Factor (DAF)

- Treedt op als: sprongfrequentie (f_p)= (veelvoud van) eigenfrequentie lege tribune (f_s)
- Gemiddelde sprongfrequentie $f_p = 2$ Hz (range: 1,5-2,8 Hz)
- **Geen resonantie (DAF=1,0) als eigenfrequentie tribune hoger is dan 6 Hz (concert) of 8 Hz (springen)**



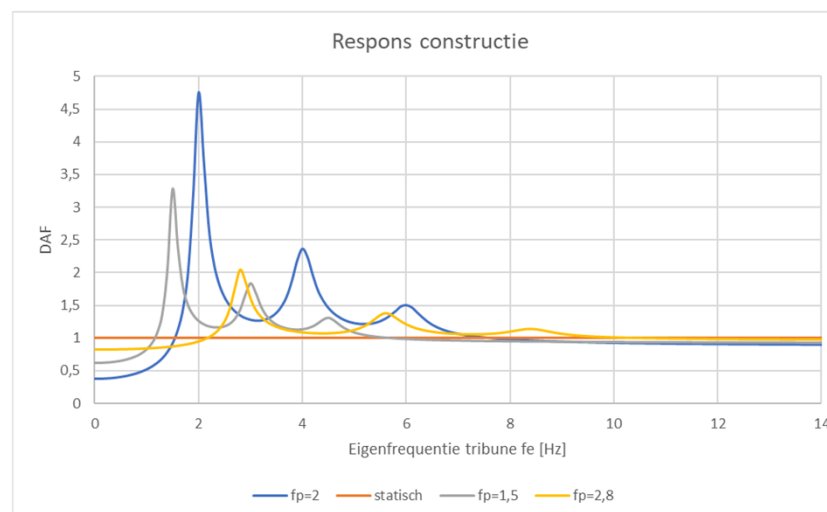
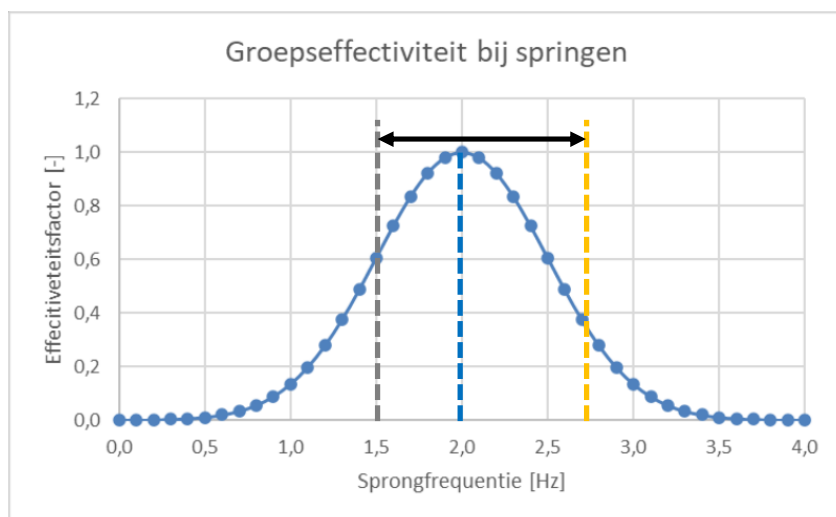
$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_s}{m_s}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A L^4}}$$



Resonantie

Resonantie effecten en groepeffectiviteit

- Groepeffectiviteit is maximaal bij 2,0 Hz (Littler 2003).
- Groepeffectiviteit neemt af bij hogere of lagere sprongfrequenties.
- Dit effect verlaagt ook de dynamische respons (DAF).
- Geen dynamische respons ($DAF=1,0$) meer bij springen als $f_s > 8$ Hz.

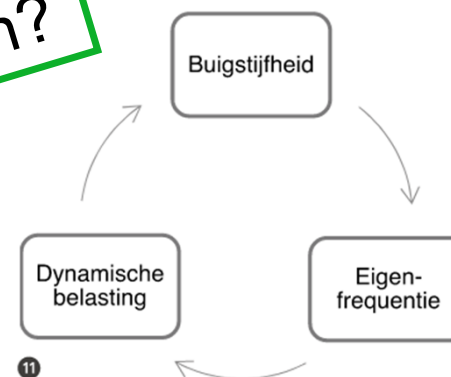
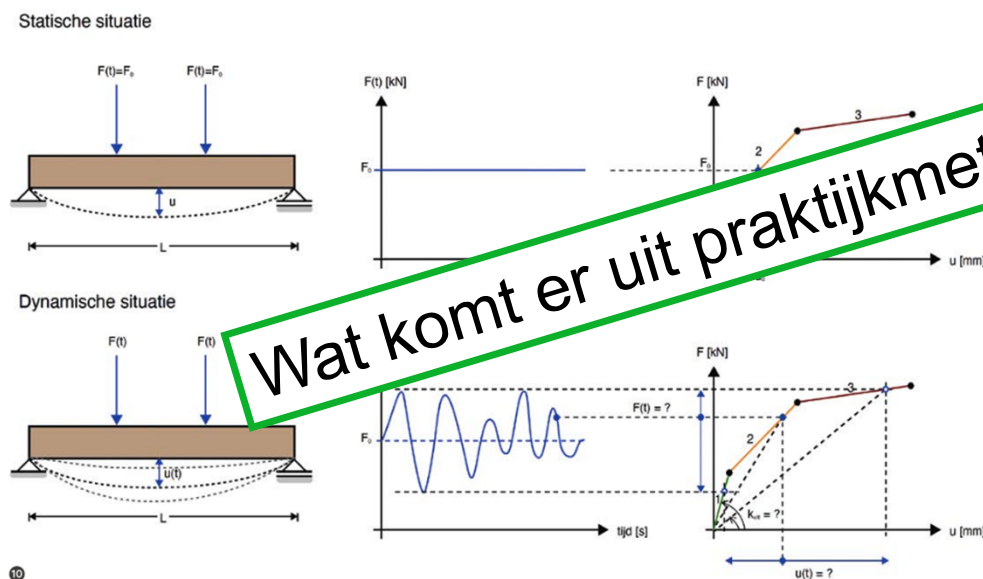


Resonantie

Eigenfrequentie bij beton?

- Eigenfrequentie hangt van de buigstijfheid
- Buigstijfheid hangt af van de belasting
- Belasting hangt af van de eigenfrequentie

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_s}{m_s}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}}$$



Conclusie

Conclusie

- Het is zinvol om de achtergrond van belastingen te kennen en te snappen
- Normbelasting bij synchroon springende menigtes veelal ontoereikend
- Groot verschil tussen dance-event / popconcert en synchroon springende menigtes
- Blijf nadenken

Dynamische belasting op tribunes

Belastingen op tribunes door synchroon springende mensen



36 CPVENT 7-2027

8 Tribune tussen voetbaltribunes

Dynamische belasting op tribunes (2)

De invloed van scheurvorming op de dynamische belasting van een bewegende menigte op een betonnen tribune-element



Bedankt

Vragen?