



Achtergronddocument voor vloertrillingen



Schlaich Bergemann
und Partner
Structural Consulting
Engineers

Inhoudsopgave

1.1.	Belastingen	3
1.2.	Waarneming en waarnemingsklassen	3
1.3.	Evaluatie.....	5
2.1.	Inleiding	7
2.2.	Transferfunctiemethode	8
2.3.	De één stap effectieve waarde of "one step root mean square" waarde.....	9
2.3.1.	Standaard loopbelasting	9
2.3.2.	Weging	10
2.4.	De ES-RMS ₉₀ -waarde bepalen	10
2.5.	Handmatige berekeningsmethode.....	12
3.1.	Modale superpositie	13
3.1.1.	Stabiele responsie	13
3.1.2.	Transiënte responsie	14
3.1.3.	Wegingsfactoren	14
3.1.4.	Contourgrafieken.....	14
3.1.5.	Gedetailleerde procedure.....	15
3.2.	Andere overwegingen betreffende trillingen.....	15
3.3.	Vereenvoudigde aanpak	15
4.1.	De modale massa verhogen	17
4.2.	De frequentie aanpassen	18
4.3.	De demping verhogen	18
4.4.	Structurele middelen	18
4.5.	Maatregelen achteraf	18

Samenvatting

Dit document biedt achtergrondinformatie bij "Trillingsontwerp van vloeren – Richtlijn". Het bevat alternatieve en meer algemene methoden voor het bepalen van de responsie van vloeren op door mensen veroorzaakte dynamische krachten.

De theoretische methoden die hier en in de richtlijn worden gepresenteerd zijn uitgewerkt en verder onderzocht in het RFCS-project "Trillingen van vloeren". De richtlijn en het achtergronddocument zijn gerealiseerd met een subsidie van het Onderzoekfonds voor Kolen en Staal in het kader van het project "HIVOSS".

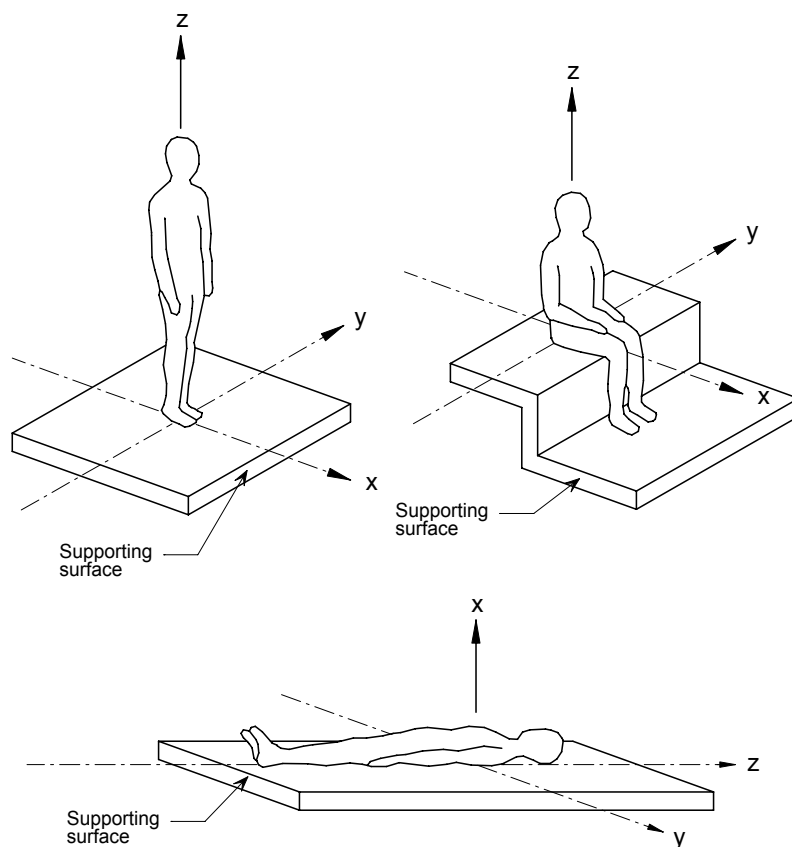
1. Ontwerpoverwegingen

1.1. Belastingen

De in de constructie aanwezige massa heeft een uiterst significant effect op zowel de frequentie van de vloerplaat als de grootte van de trillingen. Daarom is het belangrijk dat de verdeelde massa waarmee wordt gerekend in de trillingsanalyse representatief is voor de massa die in gebruik aanwezig zal zijn, aangezien een hogere massa de grootte van de vloertrilling bij een bepaalde frequentie zal verminderen. Bij het ontwerp moet de massa per oppervlakte-eenheid worden genomen als het ongecorrigeerde eigengewicht van de constructie samen met de rustende belastingen zoals het gewicht van plafonds en voorzieningen. Daarnaast kan, als de ontwerper er zeker van is dat een dergelijke belasting gegarandeerd aanwezig zal zijn in de voltooide constructie, een extra waarde worden opgenomen voor semipermanente belastingen. In het algemeen wordt aanbevolen deze extra waarde niet hoger te nemen dan 10% van de nominale veranderlijke belasting. In het algemeen wordt geen rekening gehouden met de massa van mensen die op de vloer aanwezig zijn, maar voor zeer lichte constructies is deze extra massa uiterst significant en kan in aanmerking genomen worden.

1.2. Waarneming en waarnemingsklassen

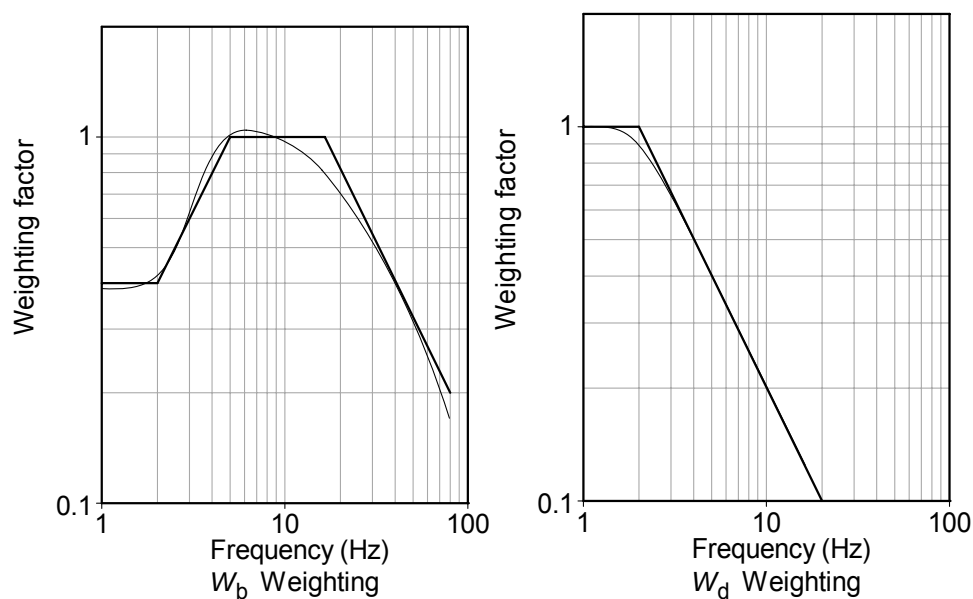
Net als bij het menselijk gehoor, is de waarneming van trillingen door de mens afhankelijk van de frequentie – menselijke oren kunnen geluid met een lage of hoge frequentie niet registreren, en op dezelfde manier kan het menselijk lichaam trillingen met een zeer hoge frequentie niet registreren. Voor het verzwakken van een trillingsresponsie, rekening houdend met die responsie, worden frequentieafhankelijke wegingsfactoren toegepast. Welk trillingsniveau kan worden waargenomen is ook afhankelijk van de invalshoek op het menselijk lichaam, en in verband daarmee wordt het basicentrische coördinatensysteem van Figuur 1.1 gebruikt (de z-as komt overeen met de richting van de menselijke ruggengraat). De drempelwaarde voor waarneming (het trillingsniveau waaronder de gemiddelde mens een beweging niet kan waarnemen) is hoger voor trillingen in de richting van de z-as dan voor die in de richting van de x- of y-as trilling, wat betekent dat trillingen in de richting van de x- of y-as makkelijker worden waargenomen.



Figuur 1.1 Trilingsrichtingen gedefinieerd in ISO 10137

Wegingsfactoren voor frequenties zijn vermeld in normen zoals ISO 10137[4]. Verschillende wegingscurves worden gegeven, afhankelijk van de trillingsrichting en de activiteit. De wegingscurves zijn ook specifiek voor de beschouwde parameter - snelheid of versnelling. In de meeste gevallen heeft trillingsanalyse ten doel ongemak te verminderen of op te heffen, maar in speciale gevallen, zoals een operatiezaal, dient het trillingsniveau zodanig te zijn dat het niet kan worden waargenomen en geen invloed heeft op de vastheid van de hand of het zicht. Waarneming en ongemak gaan uit van dezelfde wegingen, maar in het algemeen zal voor waarneming een lagere toelaatbare drempel gelden (d.w.z. een individu kan trillingen waarnemen zonder daar ongemak van te ondervinden), terwijl andere wegingscurves gelden voor beheersing van hand en zicht. De wegingscurves voor waarneming in zowel de richting van de z-as (W_b) als die van de x- en y-as (W_d) worden gegeven in [wegingsfactor – frequentie – weging]

Figuur 1.2.



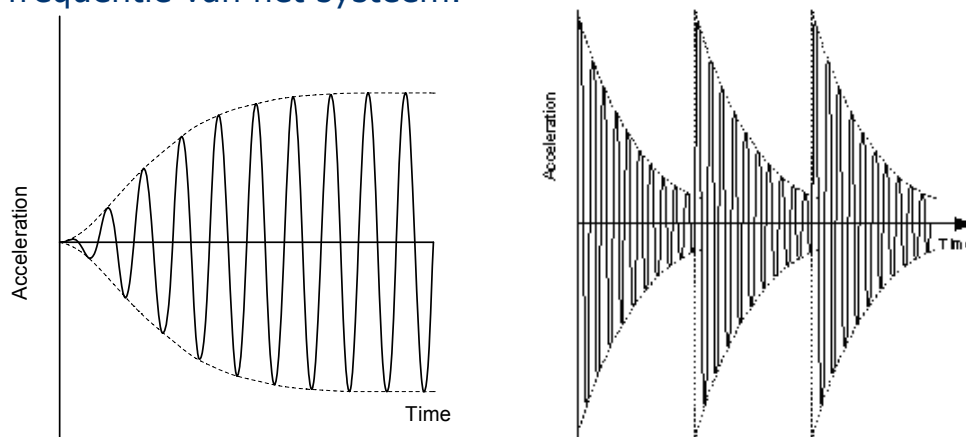
[wegingsfactor – frequentie – weging]

Figuur 1.2 W_b en W_d wegingscurves frequentie-versnelling

Ter illustratie van het gebruik van de curves, voor z-as trilling op basis van curve W_b voor ongemak geeft een sinusgolf van 8 Hz hetzelfde gevoel als een sinusgolf van 2,5 Hz of 32 Hz met de dubbele amplitude.

1.3. Evaluatie

De responsie van een systeem op normale excitatie neemt de vorm aan van een van de grafieken van Figuur 1.3, afhankelijk van de verhouding tussen de excitatiefrequentie en de natuurlijke frequentie van het systeem.



Figuur 1.3 Responsie-omhullenden

Als de frequentie van de excitatie (of hogere harmonischen van de excitatie) overeenkomt met de natuurlijke frequentie van de vloer, neemt de resulterende responsie de vorm als links in Figuur 1.3 – een geleidelijke opbouw van de responsie-omhullende van nul tot een stabiel niveau. Deze responsie staat bekend als ofwel een

resonante responsie (doordat de vloer resoneert met de excitatie) of een stabiele responsie. Voor excitatie door lopende personen treedt dit soort responsie in het algemeen op bij vloeren met een fundamentele natuurlijke frequentie van minder dan 9-10 Hz.

Als de frequentie van de excitatie significant lager is dan de natuurlijke frequentie van de vloer, is de responsie-omhullende rechts in figuur Figuur 1.3 kenmerkend, bekend als transiënte responsie. In dit geval reageert de vloerplaat op de excitatie alsof het een serie impulsen is waarbij de trilling van de ene voetstap wegsterft vóór de volgende voetstap. Deze excitatietypen zijn te zien op de ES-RMS₉₀-grafieken naarmate de contourlijnen minder afhankelijk worden van de specifieke frequentie als de frequentie van de vloer hoger wordt dan 9 Hz, waaruit blijkt dat de responsie verschuift van een stabiele responsie naar een transiënte responsie.

2. ES-RMS methode

2.1. Inleiding

De one-step root mean square [één-stap effective waarde] (ES-RMS) methode is gebaseerd op de uitkomsten van een door de ECSC gefinancierd onderzoeksproject betreffende trillingen in vloeren, zie [1]. Dit hoofdstuk beschrijft in het kort de ES-RMS-methode die aan de basis ligt van de procedure voor controle van het ontwerp.

De ES-RMS-waarde vertegenwoordigt de responsie van een vloer die in trilling wordt gebracht doordat een persoon over die vloer loopt. Hij wordt bepaald op basis van gemeten of gesimuleerde vloerkenmerken en een standaard loopbelastingsfunctie voor een persoon met een bepaald gewicht en een bepaalde loopsnelheid.

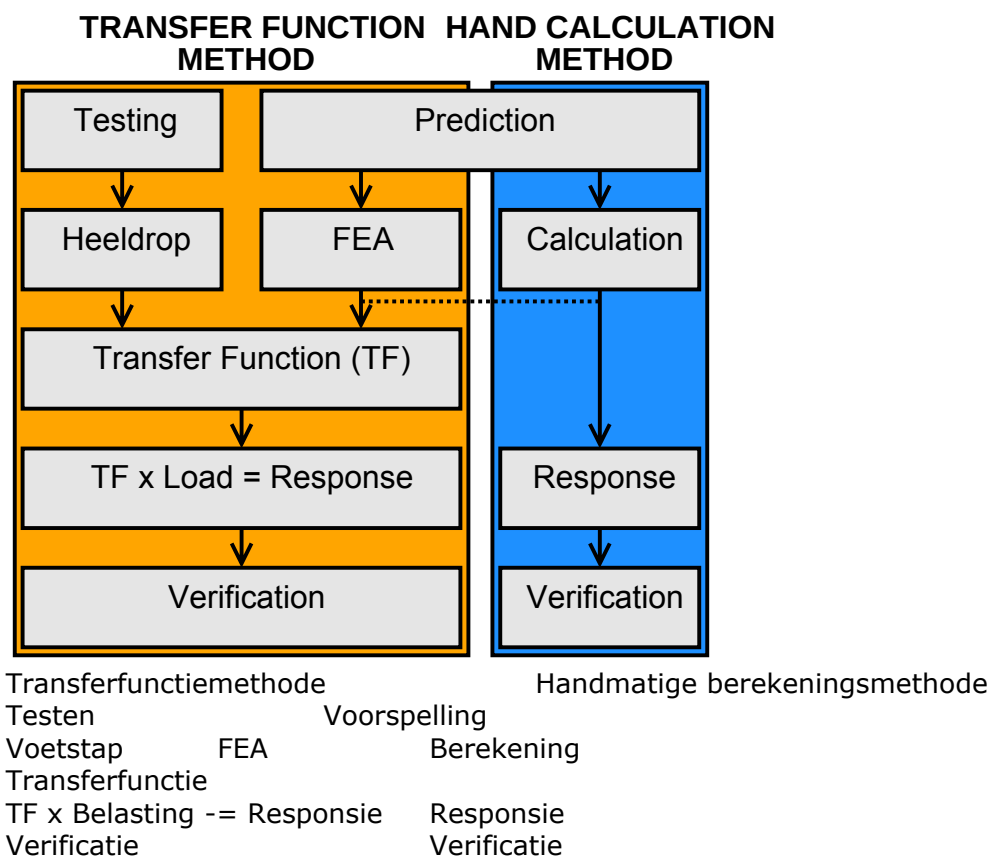
Bij het berekenen van de ES-RMS-waarde hoeven het excitatiepunt en de responsiepunten niet noodzakelijkerwijs samen te vallen. Bovendien wordt aangenomen dat het excitatiepunt gefixeerd is, dat wil zeggen dat de looproute niet in aanmerking wordt genomen. In het algemeen worden de excitatie- en responsiepunten geselecteerd waar de grootste trillingsamplitudes worden verwacht (in normale vloeren is dit gewoonlijk het midden van de vloeroverspanning).

Bij de ontwerpcontrole moet de 90 percentiel worden berekend van de ES-RMS-waarden die zijn bepaald voor personen met verschillende gewichten en loopsnelheden (of stapfrequenties). De 90 percentiel wordt aangeduid als de ES-RMS₉₀-waarde en die dient vervolgens te worden gecontroleerd aan de hand van de aanbevolen waarden in Tabel 1 van de richtlijn.

Een enkele ES-RMS-waarde voor een bepaalde stapfrequentie en het gewicht van een persoon kan worden verkregen volgens een van de volgende drie methoden:

1. Handmatige berekeningsmethode
2. Transferfunctiemethode met metingen
3. Transferfunctiemethode met eindige elementen-analyse van de vloer

De handmatige berekeningsmethode is de methode die wordt beschreven in de richtlijn en die geldt voor vloeren die eenvoudig kunnen worden beschreven als een massa-veergedempt systeem met een enkele vrijheidsgraad. De transferfunctiemethode ligt aan de basis van de berekeningsmethode. Een overzicht van de procedure voor de ontwerpcontrole waarbij de drie methoden worden vergeleken staat in Figuur 2.1.



Figuur 2.1: Schematisch overzicht van de ontwerpcontrole met de ES-RMS methode.

2.2. Transferfunctiemethode

Bij de transferfunctiemethode worden de kenmerken van de vloer beschreven in de vorm van een frequentieresponsiefunctie, FRF, of transferfunctie. De transferfunctie vertegenwoordigt de responsie van een constructie die wordt onderworpen aan een harmonische belasting (een sinusvormige belastingsfunctie variërend met de tijd) met een bepaalde frequentie en een amplitude gelijk aan één.

Als deze functie wordt gebruikt in combinatie met de standaard loopbelasting, kan de ES-RMS-waarde worden bepaald.

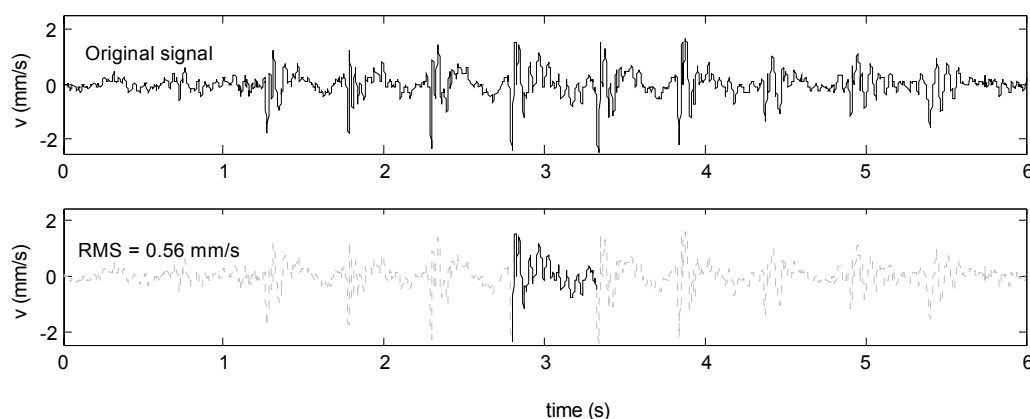
De transferfunctiemethode kan worden toegepast als de vloerresponsie wordt verkregen door ofwel meting of door eindige elementenberekeningen.

Toepassing van de transferfunctiemethode houdt in dat de berekening van de vloerresponsie plaatsvindt in het frequentiedomein.

Daarentegen wordt bij toepassing van de eindige elementenberekening, de responsie verkregen in het tijddomein. Dit kan tamelijk tijdrovend zijn aangezien voor het bepalen van de ES-RMS₉₀-waarde een groot aantal responsieberekeningen nodig is.

2.3. De één stap effectieve waarde of "one step root mean square" waarde

De ES-RMS-waarde wordt verkregen uit de responsie van een vloer op een gestandaardiseerde loopbelasting. Hij wordt gedefinieerd als de effectieve waarde (kwadratische gemiddelde) over een bepaald interval van de gewogen snelheidsresponsie op een punt op de vloer. Het interval wordt gekozen vanaf de hoogste piek in de responsie tot ofwel de vorige of de volgende piek in de responsie, zie Figuur 2.2.



Figuur 2.2: Keuze van interval in gewogen snelheidsresponsie voor de berekening van de ES-RMS-waarde.

Gegeven deze definitie komt het interval waarover de ES-RMS-waarde wordt verkregen overeen met de duur van één enkele stap. Dit verzekert een consistente meting van het trillingsniveau¹.

2.3.1. Standaard loopbelasting

De standaard loopbelasting wordt beschouwd als een serie achtereenvolgende stappen waarbij de belasting van elke stap (voet neerzetten) wordt beschreven door een polynoom. De genormaliseerde stapbelasting wordt gegeven door:

$$\frac{F(t)}{G} = K_1 t + K_2 t^2 + K_3 t^3 + K_4 t^4 + K_5 t^5 + K_6 t^6 + K_7 t^7 + K_8 t^8$$

waarin G de massa van de persoon is. De coëfficiënten K_1 tot K_8 zijn afhankelijk van de stapfrequentie (f_s) en ze staan in Tabel 2.1. De belastingsduur, t_s , wordt gegeven door de volgende formule:

¹Op deze wijze gedefinieerde ES-RMS-waarden kunnen ondubbelzinnig met elkaar worden vergeleken. Als daarentegen een constant interval groter dan de duur van een enkele stap zou worden gebruikt, dan zou de RMS-waarde over dit interval afhankelijk zijn van de stapfrequentie en de duur van het interval.

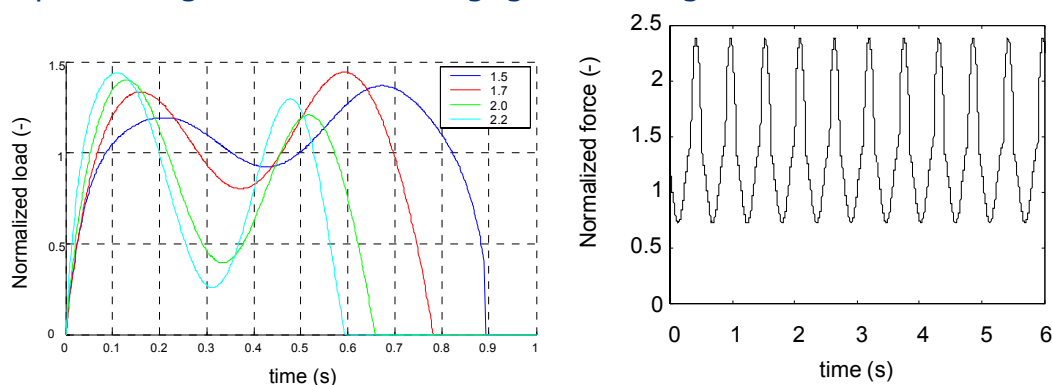
$$t_s = 2.6606 - 1.757 \cdot f_s + 0.3844 \cdot f_s^2$$

Voor $t > t_s$, $F(t) = 0$.

Tabel 2.1: Coëfficiënten K_1 tot K_8 voor bepaalde loopfrequenties (f_s)

	$f_s \leq 1.75$	$1.75 < f_s < 2$	$f_s \geq 2$
K_1	$-8 \times f_s + 38$	$24 \times f_s - 18$	$75 \times f_s - 120.4$
K_2	$376 \times f_s - 844$	$-404 \times f_s + 521$	$-1720 \times f_s + 3153$
K_3	$-2804 \times f_s + 6025$	$4224 \times f_s - 6274$	$17055 \times f_s - 31936$
K_4	$6308 \times f_s - 16573$	$-29144 \times f_s + 45468$	$-94265 \times f_s + 175710$
K_5	$1732 \times f_s + 13619$	$109976 \times f_s - 175808$	$298940 \times f_s - 553736$
K_6	$-24648 \times f_s + 16045$	$-217424 \times f_s + 353403$	$-529390 \times f_s + 977335$
K_7	$31836 \times f_s - 33614$	$212776 \times f_s - 350259$	$481665 \times f_s - 888037$
K_8	$-12948 \times f_s + 15532$	$-81572 \times f_s + 135624$	$-174265 \times f_s + 321008$

De standaard loopbelastingsfunctie wordt ontwikkeld op basis van de hiervoor gedefinieerde stapbelasting, door de stapbelasting herhaaldelijk bij deze functie op te tellen met intervallen van $1/f_s$. Voorbeelden van de standaard stapbelasting en de loopbelastingsfunctie worden gegeven in Figuur 2 3.



Figuur 2 3: Stapbelasting voor vier verschillende stapfrequenties (links) en voorbeeld van de loopbelastingsfunctie (rechts).

2.3.2. Weging

De ES-RMS-waarde wordt bepaald op basis van de gewogen snelheidsresponsie op een punt van de vloer. De gewogen responsie wordt verkregen door de volgende wegingsfunctie toe te passen:

$$|H(f)| = \frac{1}{v_0} \frac{1}{\sqrt{1 + (f_0 / f)^2}}$$

waarin $f_0 = 5,6$ Hz en v_0 is de referentiesnelheid gelijk aan 1,0 mm/s. Vanwege de deling door een referentiesnelheid, is de gewogen responsie dimensieloos.

2.4. De ES-RMS₉₀-waarde bepalen

Als hiervoor vermeld, wordt de laatste ontwerpcontrole gebaseerd op de ES-RMS₉₀-waarde. Deze waarde wordt verkregen door berekening van de ES-RMS voor alle mogelijke combinaties van

gewichten en loopsnelheden van personen als gedefinieerd in Tabel 2-2. Volgens deze tabellen moeten in totaal $35 \times 20 = 700$ ES-RMS-waarden worden berekend die corresponderen met elke mogelijke combinatie. Uit de relatieve frequentie (waarschijnlijkheid) van elke combinatie wordt de cumulatieve frequentie van de ES-RMS-waarde verkregen. De ES-RMS die correspondeert met een cumulatieve frequentie van 90% bepaalt de gezochte ES-RMS₉₀-waarde².

Tabel 2 2: Cumulatieve waarschijnlijkheidsverdeling loopsnelheid en massa van personen

Cumulatieve waarschijnlijkheid	Stapfrequentie f_s (Hz)	Cumulatieve waarschijnlijkheid	Massa [kg]
0,0003	1,64	0,0000	30
0,0035	1,68	0,0002	35
0,0164	1,72	0,0011	40
0,0474	1,76	0,0043	45
0,1016	1,80	0,0146	50
0,1776	1,84	0,0407	55
0,2691	1,88	0,0950	60
0,3679	1,92	0,1882	65
0,4663	1,96	0,3210	70
0,5585	2,00	0,4797	75
0,6410	2,04	0,6402	80
0,7122	2,08	0,7786	85
0,7719	2,12	0,8804	90
0,8209	2,16	0,9440	95
0,8604	2,20	0,9776	100
0,8919	2,24	0,9924	105
0,9167	2,28	0,9978	110
0,9360	2,32	0,9995	115
0,9510	2,36	0,9999	120
0,9625	2,40	1,0000	125
0,9714	2,44		
0,9782	2,48		
0,9834	2,52		
0,9873	2,56		
0,9903	2,60		
0,9926	2,64		
0,9944	2,68		
0,9957	2,72		
0,9967	2,76		
0,9975	2,80		
0,9981	2,84		
0,9985	2,88		
0,9988	2,92		
0,9991	2,96		

² In feite beschouwen we de ES-RMS-waarde als een willekeurige variabele en bepalen we de 90% bovengrens.

0,9993	3,00			
--------	------	--	--	--

2.5. Handmatige berekeningsmethode

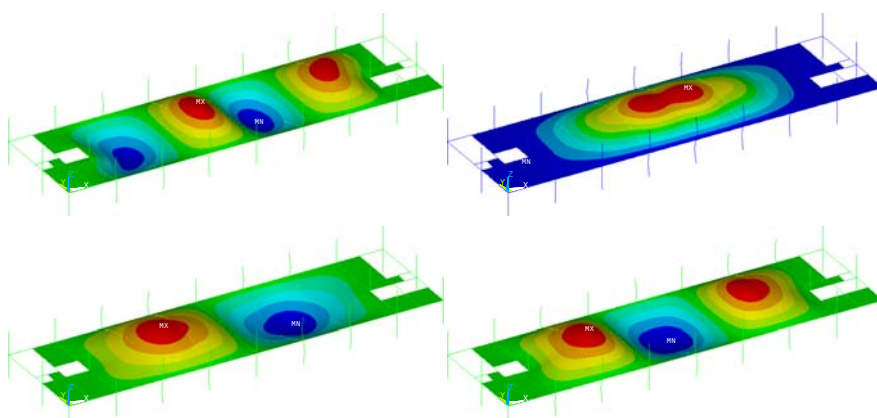
Bij de handmatige berekeningsmethode zijn de berekening van de responsie en het daaropvolgende proces ter verkrijging van de ES-RMS₉₀-waarde vooraf uitgevoerd. Bij deze methode wordt aangenomen dat de constructie een systeem is met een grote vrijheidsgraad dat makkelijk kan worden gemodelleerd met behulp van een massa-veerdemper. ES-RMS₉₀-waarden die corresponderen met verschillende combinaties van vloermassa, stijfheid en demping, zijn verkregen en worden weergegeven in de grafieken van de richtlijn.

In dit geval is het voldoende de modale parameters (massa, stijfheid en demping) te bepalen voor de beschouwde constructie en dan de corresponderende ES-RMS₉₀-waarde af te lezen uit de grafieken.

3. Alternatieve analysemethoden

3.1. Modale superpositie

Als alternatief voor de transferfunctie en de ontwerpaanpak op basis van waarschijnlijkheid volgens de ES-RMS-methode, kunnen ook technieken voor modale superpositie worden gebruikt om de responsie van een vloer op door mensen veroorzaakte trillingen te bepalen. Deze trillingen kunnen worden veroorzaakt door lopen of door meer energieke activiteiten zoals aerobics of dansen. Volgens deze aanpak wordt de vloer gemodelleerd met eindige elementen-programmatuur en de modale eigenschappen zoals de frequenties, modale massa's en trilvormen worden afgeleid.



Figuur 3.1: Trilvormen van een algemene vloer

Als de trilvormen zijn afgeleid, wordt een responsieanalyse uitgevoerd om de versnellingen van de vloer te bepalen. De invoerkrachten worden bepaald door de excitatiekrachten te ontbinden in frequentiecomponenten op basis van Fourier-reeksen. Door gebruik te maken van de ontwerpwaarden van de Fourier-coëfficiënten, kan de eis om rekening te houden met de variatie van stapfrequenties en lichaamsmassa's vervallen, en een ontwerprequentie kan eenvoudig worden berekend door analyse van de meest ongunstige stapfrequentie.

De versnellingen worden berekend op twee verschillende manieren, afhankelijk van de vraag of een stabiele of transiënte responsie wordt verwacht.

3.1.1. Stabiele responsie

Voor het stabiele of resonante geval worden de versnellingen berekend met eenvoudige dynamische theorie, waarbij de versnelling van elke vorm van elke harmonische van de excitatie gelijk is aan de verhouding tussen de uitgeoefende kracht en de modale massa, vermenigvuldigd met een dynamische

vermenigvuldigingsfactor (DMF). Deze DMF dient ter verrekening van de mate van demping in de constructie en de verhouding tussen de stapfrequentie (of de beschouwde harmonische) en de modale frequentie. In het ongunstigste geval is de harmonische van de stapfrequentie gelijk aan de modale frequentie en de DMF is gelijk aan $1/2\zeta$, waarin ζ De dempingsverhouding is. In normale vloeren is $\zeta = 3\%$, zodat de vermenigvuldigingsfactor in de orde ligt van 17. In de berekening wordt ook rekening gehouden met de grootte van de trilvorm bij de beschouwde excitatie- en responsiepunten (die zowel samenvallend of gescheiden kunnen zijn). Dit betekent dat het effect van alle beschouwde trilvormen kan worden gecombineerd zonder de trillingsniveaus te overschatten. Als eenmaal de versnellingsniveaus voor elke trilvorm en excitatie-harmonische zijn berekend, worden ze gecombineerd tot één enkele RMS-versnelling met betrekking tot de excitatie- en responsiepunten.

3.1.2. Transiënte responsie

Voor het geval van transiënte trilling wordt een impulsbelasting aangebracht op elke trilvorm bij het excitatiepunt en de bijbehorende versnelling wordt berekend door de impulsbelasting te vergelijken met de modale massa, de modale frequentie en de trilvorm. Het verval van de versnelling wordt bepaald door de demping, en door het totaal te bepalen van het versnelling verval voor elke trilvorm, kan de de RMS-versnelling worden berekend.

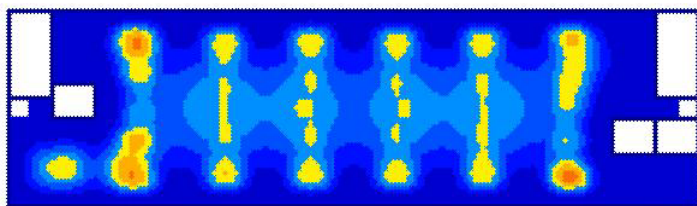
3.1.3. Wegingsfactoren

Bij de berekening van de versnelling worden de wegingsfactoren vermeld in [wegingsfactor – frequentie – weging]

Figuur 1.2 in aanmerking genomen om er zeker van te zijn dat de berekende versnelling relevant is voor de menselijke waarneming . De gewogen versnelling kan dan worden vergeleken met grenswaarden zoals die van ISO 10137 of andere normen of voorschriften.

3.1.4. Contourgrafieken

Door deze analyse uit te voeren voor samenvallende excitatie- en responsiepunten over de hele vloerplaat, kan het trillingsbeeld van de verschillende delen van de vloer worden bepaald, als afgebeeld in Figuur 3.2. Hierdoor kan de architect of de klant trillingsgevoelige onderdelen van een gebouw (zoals operatiekamers, laboratoria, etc.) plaatsen in delen die waarschijnlijk gunstige trillingseigenschappen hebben en daarentegen minder gevoelige voorzieningen (zoals werkplaatsen, kantines, etc.) op meer beweeglijke delen van de vloer.



Figuur 3.2: Variatie in trillingseigenschappen van een gewone vloer

3.1.5. Gedetailleerde procedure

De precieze berekeningswijze, met invoerwaarden zoals Fourier-coëfficiënten voor lopen en dansen en standaard gedefinieerde aanvaardbaarheidscriteria staan vermeld in SCI publicatie 354, getiteld "Design of Floors for Vibration: A New Approach"[2]. Dit omvat ook richtlijnen voor het modelleren van vloeren met eindige elementen-programmatuur.

De P354-methode leidt tot soortgelijke resultaten als die van de ES-RMS₉₀-methode, maar geeft een waarde die meer rechtstreeks vergelijkbaar is met de grenswaarden vermeld in normen zoals ISO 10137. Er kan rekening worden gehouden met trillingen die zich verplaatsen over de vloerplaat, zoals van een drukke gang naar een gevoelige operatiezaal, en verschillende wegingsfactoren kunnen worden gebruikt voor verschillende scenario's. Hierdoor kunnen verschillende excitaties worden beschouwd, of die nu ontstaan door lopen of dansen of door machines, en de effecten van trillingen op verschillende ontvangers (zoals gevoelige meetapparatuur) kunnen worden onderzocht.

3.2. Andere overwegingen betreffende trillingen

Nog een belangrijk aspect van het trillingsontwerp als beschouwd in P354 is de toename van lasten bij ritmische activiteiten. Menselijke activiteiten die trillingen kunnen veroorzaken onderwerpen de vloer altijd aan een belasting groter dan de statische belasting, maar in het geval van lopen is deze toename niet significant en valt ruim binnen de variabele belastingen die voor het ontwerp worden beschouwd. Als echter een groep mensen zich bezighoudt met een gezamenlijke ritmische activiteit (meestal op muziek zoals bijvoorbeeld aerobics of dansen) kan de extra belasting die door de activiteit ontstaan groter worden dan de belastingen die voor het ontwerp in aanmerking zijn genomen, en moet hier dus expliciet rekening mee gehouden worden. Een extreme gevallen kan dit ook vermoeiingsproblemen in de constructie veroorzaken.

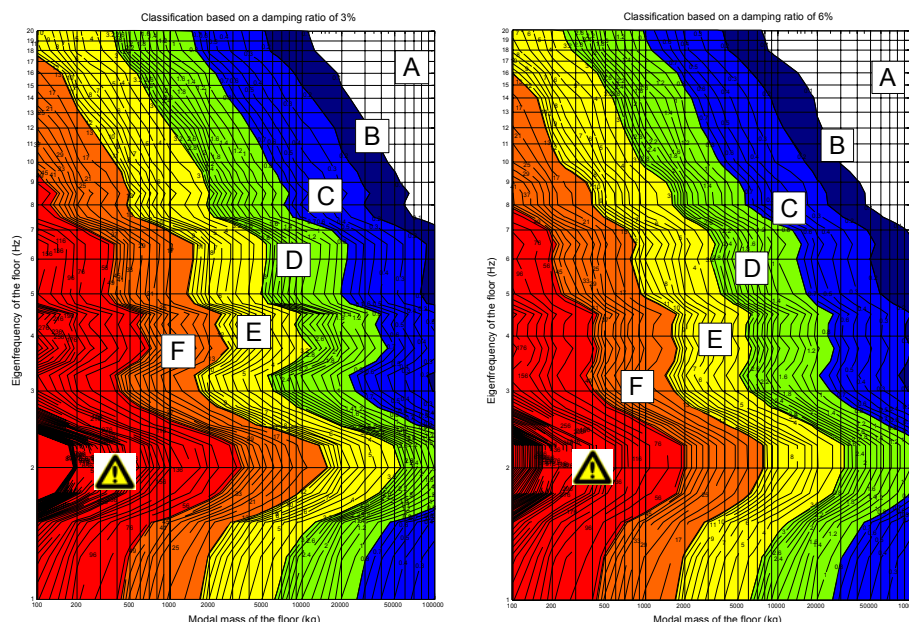
3.3. Vereenvoudigde aanpak

Als alternatief voor het maken van een eindige elementenmodel van de constructie, geeft P354 een vereenvoudigde, handmatige

berekeningsmethode. Deze is gebaseerd op een parameterstudie van een aantal modellen met de modale superpositieaanpak, en ook hier worden en wordt een versnelling berekend die kan worden vergeleken met de grenswaarden in Normen.

4. Constructies verbeteren

De drie meest effectieve manieren om de responsie van een vloer te verbeteren kunnen worden afgelezen aan de grafieken van de ES-RMS₉₀. Twee van deze grafieken, met verschillende dempingsniveaus, zijn weergegeven in Figuur 4.1.



Figuur 4.1 ES-RMS-grafieken voor 3 % demping (links) en 6 % demping (rechts)

Uit deze grafieken wordt het duidelijk dat de trillingseigenschappen van de vloer kunnen worden verbeterd op drie verschillende manieren: verhogen van de modale massa (dus in een grafiek van links naar rechts gaan); de frequentie aanpassen (dus verticaal verplaatsen in een grafiek); of de demping verhogen (dus van een punt in de linker grafiek naar het overeenkomstige punt in de rechter grafiek gaan). Als geavanceerde analysemethoden worden toegepast, is het ook mogelijk de draagconstructie aan te passen om bepaalde delen van de vloer te isoleren, nuttig als het bijvoorbeeld gaat om trillingen in operatiezalen in ziekenhuizen.

4.1. De modale massa verhogen

Meestal is de effectiefste manier om de trillingseigenschappen van een constructie te verbeteren het verhogen van de hoeveelheid massa die in beweging wordt gebracht. Dit kan gebeuren door ofwel de verdeelde massa van de vloer te verhogen (door de plaatdikte te verhogen, een dekvloer toe te voegen, etc.), of door de stijfheid van de dragende staalconstructie te verhogen zodat een groter deel van de vloer deelneemt aan de trilvorm. Een groter vloeroppervlak heeft uiteraard een grotere modale massa en dit helpt de responsie van de vloer te beperken. Massa toevoegen aan de constructie heeft

echter ook gevolgen voor de frequentie, en dus dient men op te passen dat de constructie niet sterker gaat reageren, zelfs met de extra massa, als gevolg van een lagere frequentie.

4.2. De frequentie aanpassen

De frequentie van de vloerplaat kan eenvoudig worden verhoogd door de stijfheid van de ligger te verhogen of, in bestaande constructies, extra platen aan de flenzen van het staalwerk te monteren. De voordelen hiervan zijn echter niet noodzakelijkerwijs significant, aangezien tot een vloerfrequentie boven 9-10 Hz de frequentieafhankelijkheid van de trillingseigenschappen beperkt is en alleen het "afstemmen" van de constructie tussen de harmonischen van de excitatiefunctie de responsie zal verbeteren .

4.3. De damping verhogen

In theorie de effectiefste manier om de trillingsresponsie van een vloer te verminderen is het verhogen van de aanwezige damping, aangezien de omvang van de vloerresponsie ongeveer zal halveren als de damping wordt verdubbeld. Het is echter moeilijk om damping aan vloeren toe te voegen, aangezien dampingssystemen in het algemeen moeten worden gemonteerd op plaatsen met veel beweging om maximaal effect te hebben. Dat betekent het bevestigen van dempers tussen vloeren in het midden van liggers of platen, en dat is in de meeste omstandigheden moeilijk uitvoerbaar. Significante damping kan worden toegevoegd door gebruik van "tuned mass" dempers, maar dit wordt in het algemeen niet in het ontwerpstadium overwogen en wordt meer toegepast als maatregel achteraf.

4.4. Structurele middelen

Voor uiterst gevoelige delen van de vloer, zoals in operatiezalen, kan het de voorkeur verdienen om het gebied te isoleren van de rest van de vloer in plaats van te proberen de gehele vloerplaat zo te ontwerpen dat hij voldoet aan de strenge eisen van het gevoelige gebied. Dit kan worden bereikt door delen van verschillende draagconstructies te voorzien (verschillende overspanningen bijvoorbeeld) door liggers te plaatsen met een significant hogere stijfheid dan de gewone liggers, of door extra kolommen rond de gevoelige gebieden te plaatsen. De eenvoudigste manier om deze veranderingen te beoordelen is het modelleren van de vloer in eindige elementenprogrammatuur en het ontwerp aan te passen zodat de trilvormen laten zien dat de gevoelige gebieden zijn geïsoleerd.

4.5. Maatregelen achteraf

Verbeteringsmaatregelen zijn vaak kostbaar en soms praktisch niet uitvoerbaar binnen realistische fysieke beperkingen. In sommige

situaties is het haalbaar om maatregelen te treffen die alleen het ongemak beperken dat wordt veroorzaakt door de trillingen in plaats van de aard of mate van de trillingen zelf te veranderen. Dergelijke maatregelen zijn bijvoorbeeld het wegnemen of verminderen van bijbehorende ongemaksfactoren zoals geluid dat veroorzaakt wordt door trillende delen, het veranderen van het tijdstip van de activiteit die de problemen veroorzaakt, of het veranderen van de architectonische indeling zodat gebruikers zich niet meer in de probleemgebieden bevinden.

In het algemeen gelden de hiervoor vermelde methoden voor het verbeteren van constructies op dezelfde manier voor maatregelen achteraf. Het veranderen van de massa van de vloer als maatregel achteraf kan effectief zijn, maar men moet oppassen dat de frequentie van de vloer niet zodanig afneemt dat het gunstige effect van de extra massa wordt opgeheven. De frequentie zelf kan worden verhoogd door extra staal op de flenzen van de bestaande liggers te lassen en in combinatie met een hogere massa (bijvoorbeeld door een deklaag), kan de trillingsresponsie aanzienlijk worden verbeterd.

De demping van de constructie kan ook worden verbeterd en algemene methoden om dit te doen zijn:

- ❖ veranderen van de plaats van niet-structurele componenten zoals scheidingswanden;
- ❖ plaatsing van tuned mass dampers.
- ❖ aanbrengen van speciale dempingsmaterialen.

Het veranderen van de plaats of verhogen van het aantal niet-structurele componenten draagt bij tot de demping van een vloersysteem. Doordat demping echter een uiterst variabele eigenschap is, is het helaas onmogelijk om nauwkeurig de precieze verbetering te kwantificeren die het gevolg zal zijn van het aanbrengen van zulke componenten. In het algemeen zullen praktijktests nodig zijn om vast te stellen wat de effectiviteit is van deze maatregelen en verbeteringen kunnen alleen met vallen en opstaan worden bereikt.

Tuned mass dampers, die zorgen voor passieve beheersing van de vloerbewegingen, kunnen worden gebruikt om de responsie van de vloer op inwerkende krachten zoals voetstappen te beperken. Een tuned mass damper (TMD) is een massa die wordt bevestigd aan de vloer via een veer- en dempingsapparaat. Een TMD is echter alleen effectief als de natuurlijke frequentie van de TMD sterk overeenkomt met die van de problematische trilvorm van de vloer. TMD's die aanvankelijk zijn afgestemd op de trilvormen van de vloer kunnen ontstemd raken door veranderingen in de natuurlijke

frequenties van de vloer door wijzigingen in de eigenschappen van de vloer of het verplaatsen van materialen. Er dient op gewezen te worden dat TMD's een beperkt frequentiebereik hebben waarbinnen zij effectief zijn. Als gevolg hiervan zullen bij een vloer met verschillende problematische frequenties verschillende TMD's nodig zijn om de vloerresponsie te beperken. In het algemeen ligt de massa van een TMD tussen 2% en 5% van de modale massa voor elke trilvorm die afgestemd moet worden, en dat kan problemen veroorzaken met het oog op de extra belasting die gedragen moet worden.

Specialistische materialen worden meestal gebruikt in dempingssystemen met een opgesloten laag. Materialen met een hoge energiedissipatie worden opgesloten tussen de bestaande constructie en een extra metalen plaat, en de spanningen die vervolgens ontstaan in de laag (zowel directe trek/druk als schuifkracht) dissiperen energie door hysteresis. Advies van specialisten dient te worden ingewonnen om vast te stellen of deze dempingsmethode geschikt en nuttig is (de effectiviteit van het materiaal kan bijvoorbeeld afhankelijk zijn van de temperatuur of van de amplitude van de spanningen).

5.Referenties

- [1] Europese Commissie – Technical Steel Research: “Generalisation of criteria for floor vibrations for industrial, office, residential and public building and gymnastic halls”, RFCS Report EUR 21972 EN, ISBN 92-79-01705-5, 2006, <http://europa.eu.int>
- [2] A.L. Smith, S. J. Hicks, P. J. Devine: “Design of Floors for Vibration: A New Approach”. SCI 2007, ISBN 1-85942-176-8
- [3] Waarts, P. *Trillingen van vloeren door lopen: Richtlijn voor het voorspellen, meten en beoordelen*. SBR, September 2005.
- [4] ISO 10137 – Bases for design of structure – Serviceability of buildings and walkways against vibrations, International Organization for Standardization, 2007.