

1 Model ter berekening van de lucht- en contactgeluidisolatie

1.1 Inleiding

In de NEN-EN 12354 delen 1 en 2 [3, 4] worden de modellen beschreven ter bepaling van de lucht- en de contactgeluidisolatie tussen woningen in de zware bouw. Deze wijze van modelleren is ook geschikt voor berekeningen in de lichte bouw. Er moet dan echter wel met een aantal zaken rekening gehouden worden, die in de volgende paragraaf beschreven worden. Daarna wordt voor diegene die minder vertrouwd is met de modelleerwijze van de NEN-EN 12354 de totale, voor de lichte bouw aangepaste, rekenprocedure beschreven.

1.2 Aandachtspunten bij lichte gebouwen

De trillingoverdrachtverzwakking K_{ij} wordt, conform hetgeen in paragraaf 4.2.2 van NEN-EN 12354-1 en van NEN-EN 12354-2 beschreven wordt, op het oppervlak S in plaats van op de equivalente absorptielengte a genormeerd. Voor deze normering van de K_{ij} wordt de term $K_{S,ij}$ geïntroduceerd. Echter, zodra de randdemping van de bouwelementen groot wordt (zoals wanneer vloeren op rubbers opgelegd wordt) is deze wijze van normering niet meer geldig en moet de K_{ij} genormeerd worden op de equivalente absorptielengte.

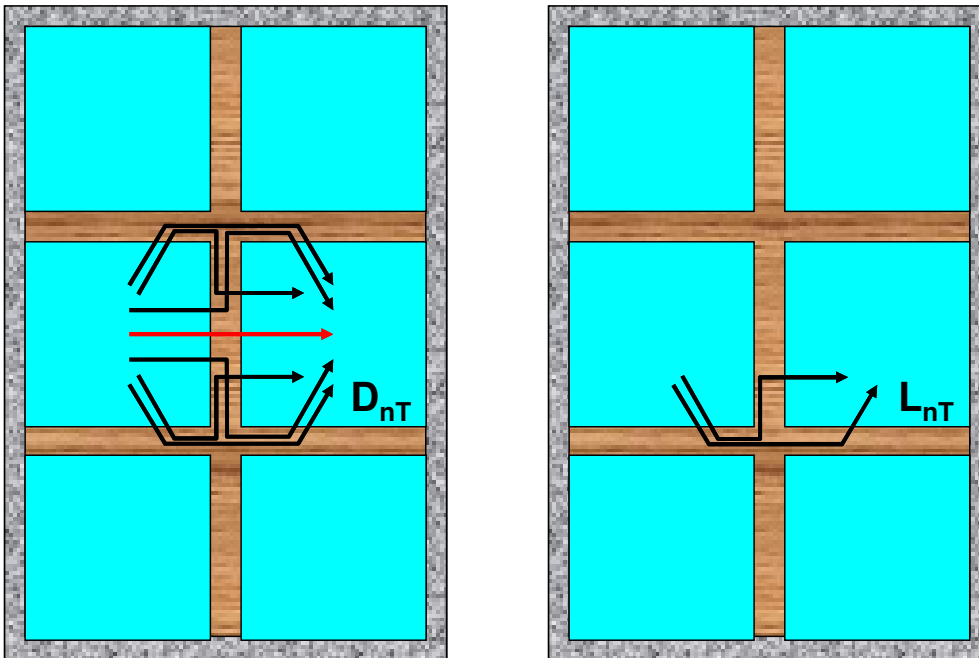
In dezelfde paragraaf (4.2.2) van NEN-EN 12354-1 en van NEN-EN 12354-2 wordt impliciet gesteld dat de invloed van dekvloeren bij de overdracht via een flankerend pad gelijk is aan de invloed bij de overdracht via een direct pad. Bij lichte bouwknoopen bestaande uit lichte basisvloeren wordt de effectiviteit van een dekvloer voor de geluidoverdracht via een flankerend pad kleiner. De mate van afname is variabel, maar zal maximaal een factor 2 bedragen en is als zodanig aan te nemen.

1.3 NEN-EN 12354 1/2 voor de lichte bouw

De overdracht vindt plaats via verschillende, onafhankelijke, overdrachtspaden. Een overdrachtspad betreft een bouwelement in de zendruimte, een bouwelement in de ontvangruimte en de bouwkundige knoop tussen die beide elementen.

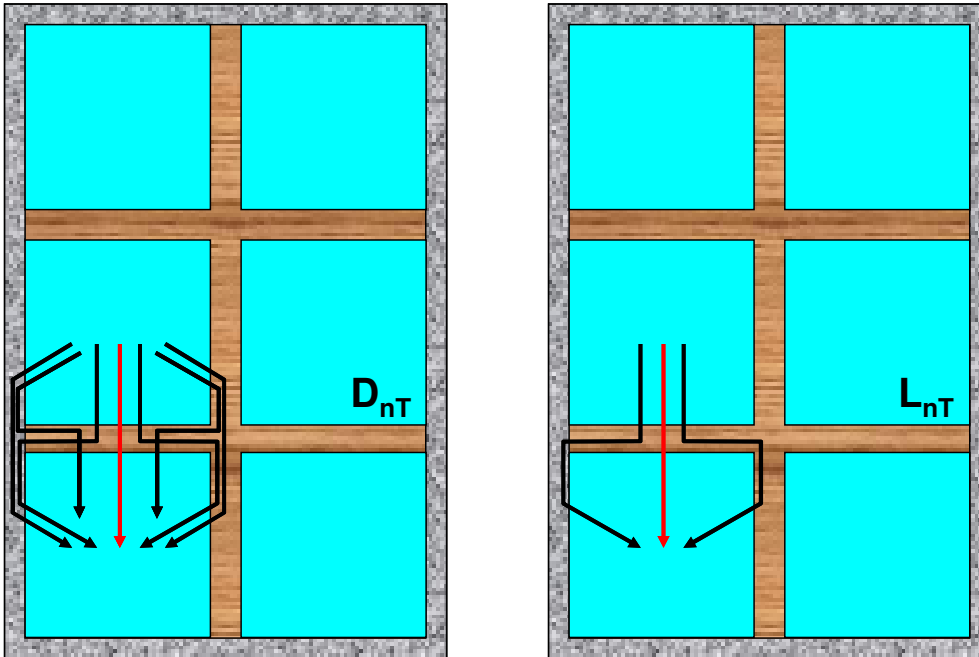
Naast de directe overdracht door de scheidingsconstructie (wand of vloer) tussen de beide ruimten vindt overdracht plaats via zogenaamde flankerende overdrachtswegen.

Deze paden zijn afgebeeld in de figuren 1 en figuur 2, voor de horizontale en de verticale overdracht, respectievelijk.



Figuur 1 Directe pad (rood) en flankerende paden (zwart) voor de horizontale overdracht van lucht- (links) en contactgeluid (rechts).

Hierin is het directe pad telkens rood afgebeeld en de flankerende paden zwart.



Figuur 1 Directe pad (rood) en flankerende paden (zwart) voor de verticale overdracht van lucht- (links) en contactgeluid (rechts).

Per direct pad kan de geluidisolatie R_{Dd} en het contactgeluidniveau $L_{n,Dd}$ berekend worden volgens:

$$R_{Dd} = R_s + \Delta R_D + \Delta R_d \quad \text{en} \quad L_{n,Dd} = L_{n,s} - \Delta L_D - \Delta R_d \quad (1)$$

Per flankerend pad kan de geluidisolatie R_{ij} en het genormeerde contactgeluidniveau $L_{n,ij}$ berekend worden volgens:

$$R_{ij} = \frac{R_i + R_j}{2} + \Delta R_i + \Delta R_j + K_{S,ij} + 10 \lg \frac{S_s}{\ell_{ij}} \quad (2)$$

$$L_{n,ij} = L_{n,ii} + \frac{R_i - R_j}{2} - \Delta L_i - \Delta R_j - K_{S,ij} - 10 \lg \frac{S_i}{\ell_{ij}}$$

Hierbij worden de grootheden R_i en $L_{n,i}$ bepaald door de eigenschappen van het basiselement en de Δ -termen worden extra in rekening gebracht zodra de verzwakking via het directe pad verbeterd wordt door bijvoorbeeld voorzetwanden, dekvloeren of plafonds. Deze grootheden kunnen allen gemeten worden onder genormeerde omstandigheden (ISO 140) en ook worden berekend met programma's als BASlab. De laboratorium inbouwomstandigheden zijn zodanig dat een randdemping optreedt die relevant is voor lichte elementen in lichte constructies. Bij relatief zwaardere bouwelementen, tussen 100 kg/m^2 en 450 kg/m^2 , treden in een laboratoriumsituatie meer randverliezen op dan bij toepassing in een licht bouwsysteem. In dat geval zal daarmee bij de toe te passen geluidisolatie R rekening moeten worden gehouden.

Op grond van een globale benadering van de laboratoriumdemping zoals in een bijlage van EN 12354-1 gegeven kan hiervoor vooralsnog als indicatie het volgende worden aangehouden

$$10 \lg \frac{T_{s,\text{Rlab}}}{T_{s,\text{test}}} \approx 10 \lg \frac{0,01 + 0,05 / \sqrt{f}}{0,01 + (m / 485) / \sqrt{f}} \quad (3)$$

Verder moet rekening gehouden worden met de gereduceerde verbetering die een dekvloer voor een flankerend pad levert. Een redelijke en eenvoudige benadering is het halveren van het directe effect voor flankerende overdracht.

De op het oppervlak S genormeerde trillingoverdrachtverzwakking $K_{S,ij}$

$$K_{S,ij} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} + 10 \lg \frac{\ell_{ij}}{\sqrt{S_i S_j}} \quad (4)$$

wordt met behulp van metingen of met behulp van SEA (Statistical Energy Analysis) berekeningen bepaald en is in NEN-EN 12354 al gedefinieerd voor het gebruik bij lichte, gedempte en gelaagde elementen in de zware bouw. Indien de bouwelementen met grote randdemping ingebouwd worden (zoals een vloer die op rubbers is opgelegd) moet de trillingoverdrachtverzwakking op de equivalenten absorptielengte a_i genormeed worden

$$a_i = \frac{2,2\pi^2 S_i}{c_0 T_s} \sqrt{\frac{f_{\text{ref}}}{f}} \quad \text{met} \quad f_{\text{ref}} = 1000 \text{ Hz} \quad (1)$$

De flankerende geluidisolatie R_{ij} en flankerend contactgeluidniveau $L_{n,ij}$ kan ook op basis van het genormeerd flankerend luchtgeluidniveauverschil D_{nf} en het flankerend genormeerd contactgeluidniveau L_{nf} berekend worden.

$$R_{ij} = D_{\text{nf}} + 10 \lg \frac{S_s \ell_{ij,\text{lab}}}{A_o \ell_{ij}} \quad L_{n,ij} = L_{\text{nf}} - 10 \lg \frac{S_F \ell_{ij,\text{lab}}}{S_{i,\text{lab}} \ell_{ij}} \quad (6)$$

Als in belangrijke mate de demping van constructies niet varieert tussen situaties, en dus met vaste waarden voor de geluidisolatie R en de trillingoverdrachtsverzwakking $K_{S,ij}$ kan worden gewerkt, is het ook mogelijk de flankerende overdracht als één geheel te presenteren als D_{nf} en L_{nf} . Deze grootheden worden daarvoor in de meetnorm ISO 10848 [5] gebruikt en gedefinieerd (formeel alleen voor het pad $ij=Ff$, maar dat is zondermeer te veralgemeniseren) bij vaste afmetingen van de vlakken en de verbindingslijn en komen feitelijk overeen met vergelijking (2).

$$D_{\text{nf}} = R_i / 2 + R_j / 2 + \Delta R_i + \Delta R_j + K_{S,ij} + 10 \lg \frac{A_o}{\ell_{ij,\text{lab}}} \quad (7)$$

$$L_{\text{nf}} = L_{n,ii} + \frac{(R_i - R_j)}{2} - \Delta L_i - \Delta R_j - K_{S,ij} - 10 \lg \frac{S_{i,\text{lab}}}{\ell_{ij,\text{lab}}}$$

Hiervoor zijn in [5] de volgende afmetingen vastgelegd: $\ell_{ij,\text{lab}} = 4,5$ m of $2,6$ m bij een verticale verbindingslijn tussen wanden of gevels; $S_{i,\text{lab}} = (\text{ca.}) 19 \text{ m}^2$ en $A_o = 10 \text{ m}^2$. De grootheden in (7) laten een directe vergelijking tussen de verschillende overdrachtspaden toe in tegenstelling tot de trillingoverdrachtsverzwakkingen op zich.

Flankerende overdracht voor bepaalde constructies met een en knooppunt kan dus op deze wijze worden gepresenteerd op basis van directe metingen (ISO 10848) of op basis van berekeningen, simulaties en deelmetingen volgens vergelijking (7). De resulterende overdracht in een gegeven praktijksituaties zoals met vergelijking (2) volgt dan uit:

$$R_{ij} = D_{\text{nf}} + 10 \lg \frac{S_s \ell_{ij,\text{lab}}}{A_o \ell_{ij}} \quad L_{n,ij} = L_{\text{nf}} - 10 \lg \frac{S_F \ell_{ij,\text{lab}}}{S_{i,\text{lab}} \ell_{ij}} \quad (8)$$

Nadat de geluidoverdracht van zowel de directe als de flankerende paden bepaald is, kunnen deze samengevat worden als

$$D_{nT} = R' + 10 \lg \frac{0,16V}{6T_o S_s}; R' = -10 \lg \left[10^{-R_{Dd}/10} + \sum 10^{-R_{ij}/10} \right] \quad (9)$$

$$L_{nT} = 10 \lg \left[10^{L_{nDd}/10} + \sum 10^{L_{n,ij}/10} \right] - 10 \lg \frac{0,16V}{T_o A_o}$$

De grootheden D_{nT} en L_{nT} vormen de basis om de prestatiegrootheden volgens het Bouwbesluit [1] te bepalen; dit wordt aangegeven in de praktijkmeetnorm NEN 5077 referentie [6]. Dit resulteert in de ééngetalsaanduidingen $D_{nT,A}$ of $D_{nT,A,k}$ en $L_{nT,A}$, waaruit ook de nu nog in het Bouwbesluit gehanteerde isolatie-indices $I_{lu,k}$ en I_{co} volgen

$$I_{lu,k} \cong D_{nT,A,k} - 52$$

$$I_{co} \cong 59 - L_{nT,A} \quad (10)$$

2 Model ter berekening van de looptrillingen

2.1 Inleiding

De beoordeling van trillingen van bouwconstructies als gevolg van lopende mensen is een onderwerp dat onderzocht is in een recent onderzoeksproject bij TNO, [7]. Het onderzoek heeft geleid tot het opstellen van een SBR richtlijn, [2], met daarin een kader voor het beoordelen van vloeren.

Dit kader biedt twee mogelijke aanpakken die geschikt zijn voor de twee doelgroepen: Architect/ontwerper en constructeur, en de modellerende constructeur. De eerste aanpak is de handrekenmethode, de tweede is de overdrachtsmethode.

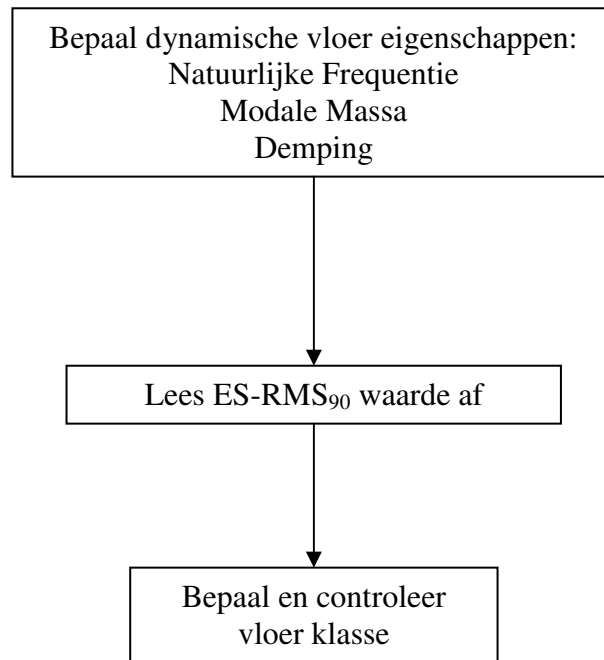
2.2 Beoordelingsgrootheid: ES-RMS₉₀

De beoordelingsgrootheid is de 90% bovengrens van de effectieve waarde van de snelheid in een punt van de vloer als gevolg van lopen op die vloer. Omdat de effectieve waarde (engels: “root mean square” of RMS) wordt berekend over de duur van een enkele stap wordt de beoordelingsgrootheid als de een-stap RMS-90 (kort: ES-RMS₉₀) aangeduid.

Er wordt een bovengrens van de effectieve waarde bepaald die rekening houdt met verschillende loopfrequenties en gewichten van mensen.

2.3 Handrekenmethode

De eerste aanpak behelst een vereenvoudigde methode voor de beoordeling van het ontwerp van een vloer voor looptrillingen. De eerste stap van deze procedure bestaat uit het bepalen van de dynamische karakteristieken ofwel de modale parameters van de vloer. Deze parameters zijn de modale massa, de natuurlijke frequentie en de demping. Met behulp van deze parameters en een set grafieken kan de ES-RMS₉₀ waarde worden afgelezen. Vervolgens wordt deze waarde beoordeeld volgens de beoordelingsklasse die aanbevolen wordt voor de gegeven gebruiksfunctie van de vloer. De drie stappen in deze procedure worden gegeven in Figuur . Deze methode wordt aangeduid als de handrekenmethode en wordt hieronder verder beschreven.



Figuur 3: Ontwerp procedure.

In de handrekenmethode wordt aangenomen dat de dynamische responsie van de vloer geschematiseerd kan worden als die van een systeem met een enkele vrijheidsgraad. De natuurlijke frequentie, modale massa en demping kunnen bepaald worden zoals hieronder aangegeven. Modale parameters kunnen ook bepaald worden door middel van metingen.

2.3.1 *Bepaling van de eigenfrequentie en modale massa*

In de praktijk, kunnen vloereigenschappen of met behulp van eenvoudige berekeningen (analytische formules) of door middel van eindige elementen analyse bepaald worden.

Bij het bepalen van de vloer eigenschappen, moet een realistisch aandeel van de veranderlijke belasting worden meegenomen in de massa van de vloer. Richtwaarden zijn 10% tot 20% van de veranderlijke belasting. Voor zeer lichte vloeren wordt aanbevolen om de massa van een persoon ook te nemen in de modale massa van de vloer. Een minimale representatieve waarde voor de meewerkende massa van een persoon is 30 kg.

2.3.2 *Analytische formules*

Voor handberekeningen, worden formules voor de bepaling van de eigenfrequenties en de modale massa van isotrope en orthotrope platen en balken gegeven in de richtlijn.

Bijvoorbeeld voor een vierkante vrij opgelegde plaat zijn de eigenfrequentie, f , en de modale massa, m , gegeven door:

$$f = \frac{\pi}{L^2} \sqrt{\frac{E t^3}{12 \cdot \mu (1 - \nu^2)}} \quad (11)$$

$$m = \frac{M_{tot}}{4}$$

Hierin is E de elasticiteitsmodulus, ν the Poisson verhouding, μ is the massa van de vloer per vierkante meter, L de lengte van een zijde van de vloer en M_{tot} de totale massa van de vloer ($= \mu L^2$)

2.3.3 *Bepaling van de demping*

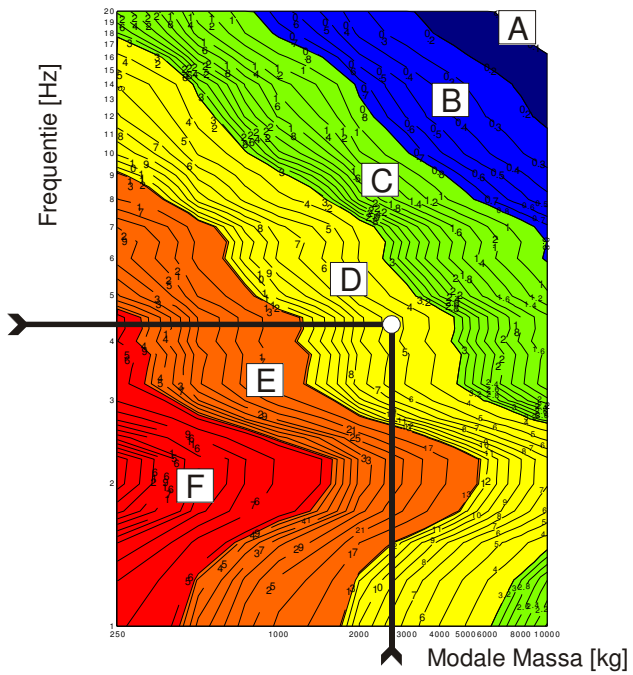
Demping heeft een grote invloed op het trilgedrag van de vloer. Waarden voor de dempingverhouding kunnen worden bepaald aan de hand van Tabel 1 voor verschillende materialen, meubilair en afbouw. Het totale (systeem) demping D wordt verkregen door de waarden D_1 t/m D_3 op te tellen.

Tabel 1: Bepaling van de demping

Type	Demping (% van kritische demping)
Materiaal demping D_1	
Hout	6%
Beton	2%
Staal	1%
Staal-beton	1%
Demping door meubilair D_2	
Traditionele kantoor voor 1 t/m 3 personen met scheidingswanden	2%
Papierloos kantoor	0%
Kantoor met open ruimtes	1%
Bibliotheek	1%
Woningen	1%
Scholen	0%
Sportzalen	0%
Demping door afbouw D_3	
Plafond onder vloer	1%
Zwevende dekvloer	1%
Totale Demping $D = D_1 + D_2 + D_3$	

2.3.4 *Bepaling van de vloerklasse*

Als de modale massa en eigenfrequentie en demping bepaald zijn, kan zowel ES-RMS₉₀ waarde als de bijbehorende vloerklasse afgelezen worden met behulp van de diagrammen zoals die in Figuur .



Figuur 4: Toepassing van grafieken in handrekenmethode

Het diagram wordt toegepast door op de x-as de modale massa en op y-as de eigenfrequentie op te zoeken. De ES-RMS₉₀ waarden en bijbehorende vloerklasse wordt afgelezen bij de kruising van de lijnen vanuit de twee gezochte punten op de x en y assen (zie Figuur).

2.3.5 Aanbevolen vloerklasse (Beoordelingsklasse)

In de onderstaande tabel worden zes vloerklassen (A t/m F) met de daartoe behorende ES-RMS₉₀ waarden geïntroduceerd. In deze tabel worden ook de aanbevolen te hanteren klassen gegeven ten aanzien van de gebruiksfunctie.

Tabel 2: Indeling van trillingssterkte in klassen en aanbevolen niveaus ten aanzien van gebruiksfunctie

Klasse	ES-RMS ₉₀		Gebruiksfunctie										
	Ondergrens	Bovengrens	Kritische werkruimte	Gezondheid	Onderwijs	Woonfunctie	Kantoor	Bijeenkomstfunctie	Winkel	Hotel	Gevangenis	Industrie	Sport
A	0.0	0.1	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
B	0.1	0.2	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
C	0.2	0.8	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
D	0.8	3.2	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
E	3.2	12.8	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
F	12.8	51.2	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

	Aanbevolen
	Kritisch
	Niet aanbevolen

2.3.6 Systemen met meer dan een eigenfrequentie

In bepaalde gevallen, is de vloerresponsie gekenmerkt door meer dan een natuurlijke frequentie. In deze gevallen, moet de ES-RMS₉₀ waarde bepaald worden als een combinatie van ES-RMS₉₀ waarden verkregen voor elke trilvorm. De procedure is als volgt:

- Bepaal de eigenfrequenties.
- Bepaal de modale massa en demping voor elke eigenfrequentie.
- Bepaal de bijbehorende ES-RMS₉₀ waarde voor elke eigenfrequentie.
- Benader de totale (of gecombineerde) ES-RMS₉₀ waarde met behulp van:

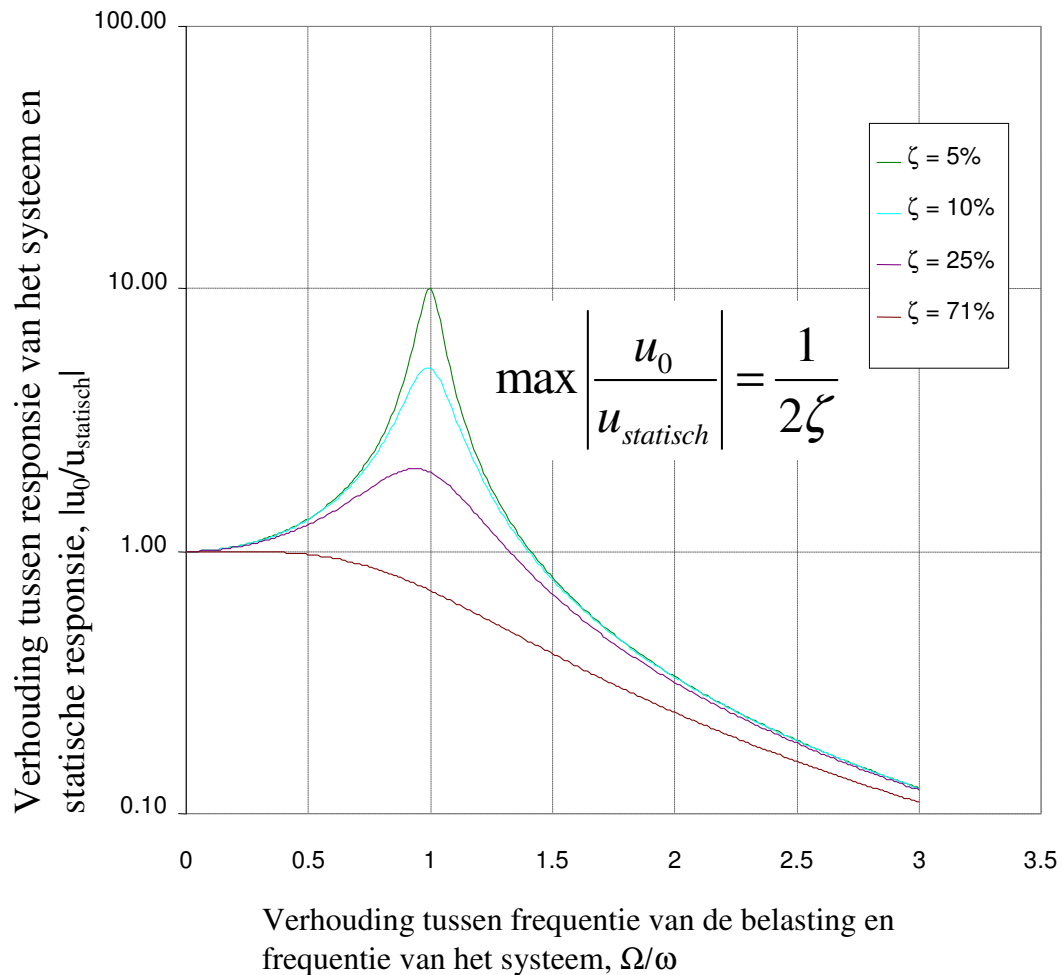
$$ES - RMS_{90} = \sqrt{\sum_i ES - RMS_{90,i}^2} \quad (12)$$

Lees de bijbehorende vloerklasse af vanuit Tabel 2.

2.4 Overdrachtsmethode

In de overdrachtsmethode worden de vloercharacteristieken beschreven in termen van een overdrachtsfunctie in plaats van modale parameters.

De overdrachtsfunctie stelt de relatie voor tussen de verplaatsing van het systeem en de kracht die op dat systeem werkt voor verschillende frequenties, zie Figuur .



Figuur 5: Voorbeeld van een overdrachtsfunctie

Vervolgens wordt, door middel van een statistische analyse de ES-RMS₉₀ waarde van de desbetreffende vloer bepaald. De handrekenmethode, welke een vereenvoudigde versie van de overdrachtsmethode betreft, is gebaseerd op de klassieke overdrachtsfunctie voor een systeem met een enkele vrijheidsgraad. De probabilistische analyse om de ES-RMS₉₀ waarde te bepalen is vooraf uitgevoerd.

De overdrachtsmethode kan worden toegepast voor die gevallen waar de vloerresponsie met behulp van eindige elementen analyses of metingen is bepaald.

2.4.1 Eindige elementen analyse

De eindige elementen analyse kan ook gebruikt worden ten behoeve van de handrekenmethode. Verschillende eindige elementen programma's kunnen dynamische berekeningen uitvoeren en hebben modules om eigenfrequenties te bepalen. Veel programma's kunnen bij een frequentie analyse ook automatisch de modale massa uitrekenen.

Opgemerkt wordt dat eindige elementen modellen voor de bruikbaarheidsgrensstoestand (SLS) en voor de uiterstegrensstoestand (ULS) wezenlijk kunnen verschillen.

Een typisch voorbeeld is die van de selectie van de randvoorwaarde van de vloer. Een verbinding die in ULS als een volledig scharnier mag worden beschouwd kan zich in SLS als een volledig moment vaste verbinding gedragen.

Voor beton, moet de dynamische elasticiteitsmodulus 10% hoger worden genomen dan de statische tangentiële elasticiteitsmodulus E_{cm} .

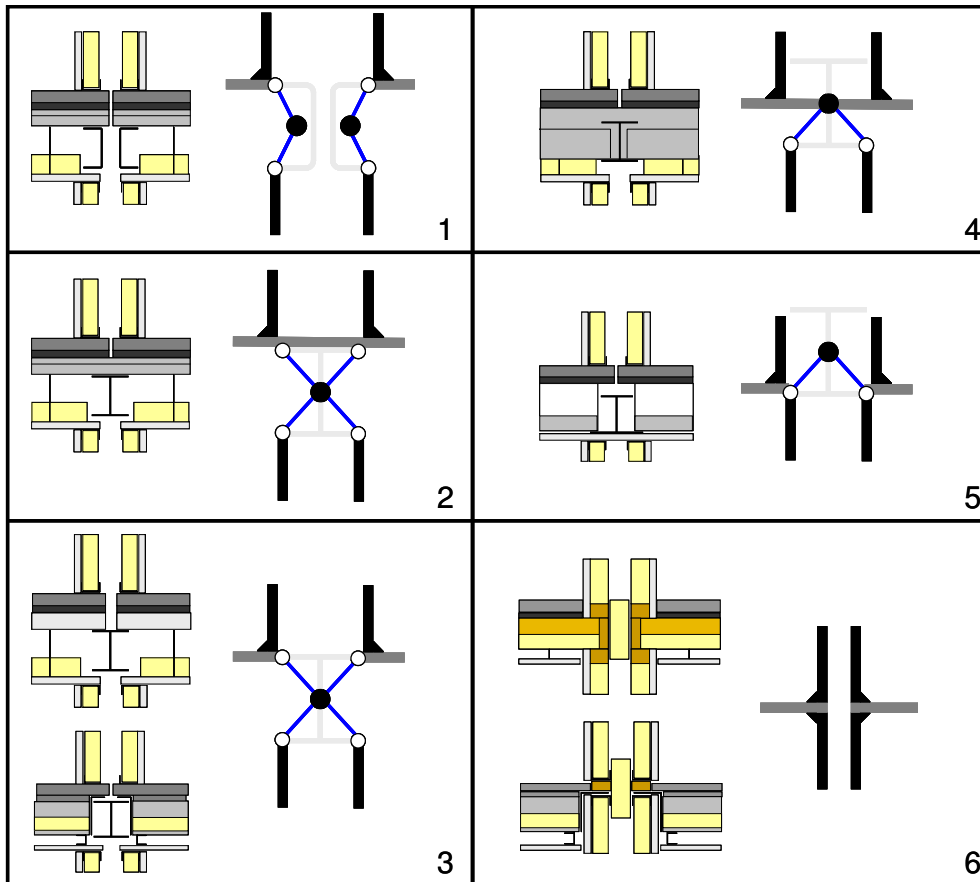
In het vervolg wordt verder ingegaan op het gebruik van de eindige elementen methode ten behoeve van de overdrachtsmethode. De aandachtspunten in de modellering die daarin behandeld worden gelden ook voor een beperkte analyse ten behoeve van de bepaling van de dynamische parameters voor de handrekenmethode.

2.5 Model ter berekening van de looptrillingen

De lichte bouwknope worden beoordeeld op de looptrillingen van de vloeren met behulp van de SBR richtlijn trillingen van vloeren door lopen [2]. Hierin wordt de grootheid $ES-RMS_{90}$ geïntroduceerd die de 90%-bovengrens van alle voorkomende looptrilling-niveaus ten gevolge van een stap beschrijft. Om deze waarde volgens de SBR richtlijn te bepalen moet de constructeur eerst de overdrachtsadmittanties Y van de constructie kennen. De admittantiespectra zijn met behulp van FEA-pakketten (Finite Element Analysis) te berekenen. De berekeningen gebeuren op basis van een model dat het bouwsysteem beschrijft. Deze paragraaf presenteert een stappenplan, waarmee eenvoudige en reproduceerbare FEA-modellen gemaakt kunnen worden die de complexe knopen op betrouwbare wijze representeren.

2.5.1 *Stap 1: keuze van de randcondities*

De randcondities die in het FEA-model te hanteren zijn, volgen uit de te modelleren bouwknop. De wijze waarop de vloeren en de wanden op de bouwknop aansluiten, is namelijk karakteristiek voor een bepaalde bouwknop en definieert daarmee de randcondities in het model. Figuur 6 geeft van alle relevante typen lichte bouwknope de bijbehorende randcondities schematisch weer.



Figuur 6 De 6 typen randcondities waarmee alle relevante lichte bouwknoepn beschreven kunnen worden.

De modelleur bepaalt in welke categorie het bouwsysteem valt en weet automatisch welke randcondities te hanteren zijn. Hieronder volgt een korte beschrijving van de 6 typen randcondities.

Type 1:

In groep 1 bevinden zich de systemen uit de staalskeletbouw waarvan de vloeren rusten op een gedilateerde dubbele ligger. De vloeren liggen scharnierend op de liggers, wat met de witte stippen is aangeduid. Verder zijn de vloeren kinematisch gekoppeld aan de ligger, wat met de blauwe lijnen aangeduid is. Door het eigengewicht van de wanden en de verbindingen hiertussen met de vloeren, zijn deze momentvast gekoppeld aan de vloeren.

Type 2:

In de tweede groep bevindt zich het systeem staalskeletbouw met een lage staalplaatbetonvloer. De basisvloer loopt over de knoop door en wordt met een doorgetrokken streep geïllustreerd. De vloeren liggen scharnierend op de uiteinden van de flenzen van de dwarsbalk. Dit wordt gekenmerkt door de witte stippen. De wanden rusten momentvast op de vloeren. Aan de bovenkant zijn de wanden scharnierend gekoppeld aan de onderflenzen van de dwarsbalk. De blauwe lijnen kenmerken de puntparen waartussen een kinematische koppeling gedefinieerd moet worden.

Type 3:

In de derde groep bevinden zich de knoepn uit de systemen staalskeletbouw met een houten vloer, een staalframevloer en een Quantumvloer. In deze groep rusten de vloeren scharnierend op de uiteinden van de bovenflenzen van de dwarsbalk (witte stippen). Aan de onderkant zijn de wanden momentvast

gekoppeld aan de vloeren en aan de bovenkant scharnierend aan de balk. De kinematische koppelingen worden gekenmerkt door de blauwe lijnen.

Type 4:

In de vierde groep bevindt zich systeem staalskeletbouw met een hoge staalplaatbetonvloer. De dwarsligger is in de vloer gegoten en dit zorgt voor een momentvaste koppeling tussen de dwarsligger en de vloer. Dit wordt geïllustreerd door de zwarte stippen. Verder gelden voor de wanden dezelfde randcondities als voor wanden uit groep 1. Ook hier worden met blauwe lijnen de punten verbonden waartussen een kinematische koppeling gedefinieerd moet worden.

Type 5:

In groep 5 bevindt zich het systeem staalskeletbouw met een IDES-vloer. Deze groep randcondities is gelijk aan de randcondities van groep 3, op één verschil na. De vloeren rusten op de uiteinden van de onderflenzen van de dwarsbalk. Hierdoor worden de vloeren, de dwarsbalk en de bovenkant van de wanden aan dezelfde punten gekoppeld.

Type 6:

In groep 6 bevinden zich de knopen uit de systemen Houtskeletbouw en Staalframebouw. Deze knopen worden gekenmerkt door de horizontale ontkoppeling tussen de woningen die in het model aangenomen kunnen worden. Door het gewicht van de wanden en de daarbovenop steunende vloeren, wordt aangenomen dat de wanden momentvast gekoppeld met de vloeren zijn.

Kinematische koppelingen kunnen in het merendeel van de commercieel verkrijgbare FEA-pakketten vrij standaard gerealiseerd worden. Hierbij is van belang, dat de modelleur de componenten correct aan elkaar koppelt (momentvast dan wel scharnierend) en dat bij deze koppeling de relatieve ligging van de elementen ten opzichte van elkaar gedefinieerd wordt. In het door TNO ontwikkelde FEA-pakket DIANA kunnen deze kinematische koppelingen met behulp van zogenaamde *tyings* gerealiseerd worden.

2.5.2 Stap 2: modelleren van de vloeren

Zodra de randcondities bepaald zijn, worden als eerste de vloeren gemodelleerd. Deze, in het algemeen inhomogene, vloeren representeert de modelleur door equivalente homogene orthotrope platen met dezelfde afmetingen. Het proces van het homogeniseren gebeurt in de volgende stappen:

- Kies een fictieve dikte h voor de equivalente vloer in de orde van 1% van de vloeroverspanning.
- Bereken de buigstijfheid per meter van de vloer in de draagrichting, EI_y , en in de richting loodrecht hierop EI_x .
- Kies eventueel een dekvloer en tel de buigstijfheid hiervan in de twee richtingen op bij de buigstijfheden van de basisvloer.
- Bereken de equivalente elasticiteitsmoduli E_y en E_x zo, dat de homogene plaat dezelfde buigstijfheid per meter heeft als de vloer.
- De Poisson coëfficiënten van het equivalente materiaal worden gelijk aan nul gezet.
- De dichtheid van de homogene plaat wordt zo berekend dat de totale massa gelijk is aan totale massa van het vloerpakket (basisvloer + dekvloer + plafond).

De berekende materiaaleigenschappen kent de modelleur aan de orthotrope plaat toe.

Als laatste stap kiest de modelleur de elementgrootte D waarmee de plaat gediscretiseerd wordt zodanig dat

$$D = 0,2\lambda \quad \text{met} \quad \lambda = \sqrt{1,8c \frac{h}{f}} \quad \text{en} \quad c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (13)$$

2.5.3 Stap 3: modelleren van de wanden en balken

De, in het algemeen inhomogene, wanden representeert de modelleur ook door homogene orthotrope platen. Deze procedure is dezelfde als beschreven in stap 2 voor de vloeren. Als laatste representeert de modelleur de draagconstructie met behulp van eindige balkelementen. De eigenschappen van de balkelementen worden zo gekozen dat de buigstijfheden EI in de twee dwarsrichtingen, de torsiestijfheid GI_t en de massa per lengte μ gelijk zijn.

2.5.4 Stap 4: modelleren van de demping

De dempingsmaat is de laatste parameter die het model definieert. Het bepalen van de demping door middel van metingen heeft de voorkeur. Indien dit niet mogelijk is, maakt de modelleur gebruik van de dempingstabel die in de SBR richtlijn [2] gepubliceerd is (zie Tabel 1).

De demping wordt in het model met behulp van het Rayleigh dempingsmodel gesimuleerd. Hiervoor worden een massa-factor α en een stijfheidsfactor β zo gedefinieerd, dat

$$2\zeta\omega = \alpha + \beta\omega^2. \quad (14)$$

De Rayleigh demping is dus een frequentieafhankelijke waarde. Aangezien de eerste eigenmode het meest dominant aanwezig is bij de bepaling van de looptrillingen, moet de modelleur eerst met het FEA-model de eerste eigenhoekfrequentie ω van het systeem bepalen, de factor β gelijk aan nul zetten en vervolgens de factor α met vergelijking 14 berekenen.

2.5.5 Stap 5: berekening van Y

Nadat de modelleur de eerste vier stappen doorlopen heeft, is het FEA-model gereed. De vijfde en laatste stap moet genomen worden om met behulp van het model de overdrachtsadmittantie Y te bepalen. Dit kan op drie verschillende manieren gebeuren, waarvan de uiteindelijke keuze meestal afhangt van de mogelijkheden van het gebruikte FEA-pakket.

Expliciete tijdsberekening

Bij een expliciete tijdsberekening definieert de modelleur op de excitatiepositie een naar beneden gerichte kracht F als functie van de tijd

$$F(t) = \begin{cases} \sin\left(\pi \frac{t}{0,01}\right) & t < 0,01 \text{ s} \\ 0 & 0,01 \text{ s} \leq t \leq 4 \text{ s} \end{cases} \quad (15)$$

De stapgrootte Δt wordt meestal zelf door het FEA-pakket zo gekozen dat de berekening stabiel blijft. Indien dit niet automatisch gebeurt, dan bepaalt de modelleur de stapgrootte zelf volgens

$$\Delta t = 0,9 \frac{2}{\omega_{\max}} \quad (16)$$

waarbij ω_{\max} de maximale eigenhoekfrequentie van het systeem is die met het pakket bepaald kan worden. De bepaling van de stapgrootte volgens deze regel is te gebruiken voor het zogenaamde *central difference* schema. Dit is een expliciete tijdintegratie die door de meeste expliciete FEA-pakketten gebruikt wordt. De tijdsduur van de simulatie stelt de modelleur gelijk aan 4 s. Hierna kan de berekening gestart worden.

De admittantie die de snelheid op het responsiepunt relateert aan de kracht op het excitatiepunt wordt berekend door het spectrum van die snelheid te delen door het spectrum van de kracht. De modelleur gebruikt een FFT-software (bijvoorbeeld Matlab) om de spectra van de snelheid, die als functie van de tijd door het FEA-pakket gegenereerd wordt, en van kracht te berekenen. Deze twee spectra deelt de modelleur op elkaar en de modelleur kan met het resultaat, namelijk de admittantie Y , volgens de procedure beschreven in de SBR richtlijn [2] de ES-RMS₉₀ waarde bepalen.

Impliciete tijdsberekening

Bij een impliciete tijdsberekening definieert de modelleur op de excitatiepositie een naar beneden gerichte kracht F als functie van de tijd

$$F(t) = \begin{cases} \sin\left(\pi \frac{t}{0,01}\right) & t < 0,01\text{s} \\ 0 & 0,01\text{s} \leq t \leq 4\text{s} \end{cases} \quad (17)$$

De stapgrootte Δt wordt gelijk aan 2 ms gekozen. De tijdsduur van de simulatie stelt de modelleur gelijk aan 4 s. Hierna kan de berekening gestart worden.

Aangezien de impliciete tijdsberekening een techniek is waarbij grote matrices geïnverteerd worden, zal de expliciete tijdsberekening voor dit soort berekeningen minder rekentijd vergen dan de impliciete tijdsberekening.

De admittantie die de snelheid op het responsiepunt relateert aan de kracht op het excitatiepunt wordt berekend door het spectrum van die snelheid te delen door het spectrum van de kracht. De modelleur gebruikt een FFT-software (bijvoorbeeld Matlab) om de spectra van de snelheid, die als functie van de tijd door het FEA-pakket gegenereerd wordt, en van kracht te berekenen. Deze twee spectra deelt de modelleur op elkaar en kan met het resultaat, namelijk de admittantie Y , volgens de procedure beschreven in de SBR richtlijn [2] de ES-RMS₉₀ waarde bepalen.

Harmonische responsieberekening

Bij de harmonische responsieberekening wordt de admittantie door het FEA-pakket bepaald, zonder dat er een signaalverwerkingsprocedure doorlopen hoeft te worden. Een dergelijke berekening verloopt namelijk in het frequentiedomein. Volgens de SBR-richtlijn moeten de admittanties van 1 Hz t/m 80 Hz berekend worden. Het is echter gebleken dat het voldoende is om de admittanties van 1 Hz t/m 30 Hz te berekenen. Deze waarden geeft de modelleur als input aan het pakket alvorens de berekeningen te starten. Verder wordt de frequentiestapgrootte gelijk aan 0,25 Hz gezet. Als kracht definieert de modelleur een éénheidskracht op de excitatiepositie en laat hij de snelheid op de responsiepositie door het pakket uitgeven. Dit is dan de frequentieafhankelijke snelheid bij een ideale pulsbelasting met amplitude 1. Dit is de admittantie Y . Deze admittantie gebruikt de modelleur vervolgens in de procedure, beschreven in de SBR richtlijn [2], om de ES-RMS₉₀ waarde te bepalen.

3 Referenties

- [1] Bouwbesluit online, <http://www.bouwbesluitonline.nl>
- [2] SBR richtlijn, *Trillingen van vloeren door lopen – Richtlijn voor het voorspellen, meten en beoordelen*, 2005.
- [3] NEN-EN 12354-1, *Geluidwering in gebouwen – Berekeningen van de akoestische eigenschappen van gebouwen met de eigenschappen van de bouwelementen – Deel 1: Luchtgeluidisolatie tussen ruimten*, mei 2000.
- [4] NEN-EN 12354-2, *Geluidwering in gebouwen – Berekeningen van de akoestische eigenschappen van gebouwen met de eigenschappen van de bouwelementen – Deel 2: Contactgeluidisolatie tussen ruimten*, april 2000.
- [5] ISO 10848, *Acoustics – Laboratory measurement of the flanking transmission of airborne and impact sound between adjoining rooms – Part 1: Frame document*, april 2006.
- [6] NEN 5077, *Geluidwering in gebouwen – Bepalingsmethoden voor de grootheden voor geluidwering van uitwendige scheidingsconstructies, luchtgeluidisolatie, contactgeluidisolatie, geluidniveaus veroorzaakt door installaties en nagalmtijd*, oktober 2006.
- [7] 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>.