

Geluidsoverdracht bij lichte bouwsystemen is vanwege de gelaagde opbouw net iets anders dan bij de zwaardere monoliete bouw. De normen dekken de berekening en toetsing onvoldoende af. Ook het trillingsgedrag van vloeren door lopende personen verschilt. De crux zit in de koppeling en ont koppeling van de opbouw van de vloer maar vooral in de bouwknop. Daarom is onderzoek gedaan onder de naam 'Bouwknopen in lichtgewicht gebouwen' voor het opstellen van gebruikersvriendelijke rekenmethoden om de geluidsisolatie en de trillingsniveaus te bepalen. Dat is gelukt en binnenkort ook online beschikbaar.

Het Bouwbesluit stelt voor woningbouw strengere eisen aan de geluidsisolatie dan voor de utiliteitsbouw. Voor de lucht- en contactgeluidsisolatie zelfs 5 dB zwaarder. Het geringe gewicht van lichte bouwsystemen vergroot de 'spanning' vanwege de kans op hoor- en voelbare trillingen. Echter, de gangbare rekenmethoden uit NEN-EN 12354-1/2^{[1][2]} zijn oorspronkelijk uitsluitend bedoeld voor zware bouwsystemen.

In het Bouwbesluit worden verder ook geen eisen gesteld aan de trillingsniveaus door bijvoorbeeld het lopen van een persoon. De constructeur maakt daarom gebruik van de Eurocode: de eerste eigenfrequentie van de vloer mag niet lager zijn dan 3 Hz, tegen trillingshinder. Deze eis is gebaseerd op de maximale 'stapfrequentie' van 3 Hz en op de aan-

len is TNO in 2006 begonnen met een groot aantal partners aan het gesubsidieerd (EZ) samenwerkingproject 'Bouwknopen in lichtgewicht gebouwen'. Het doel is het opstellen van gebruikersvriendelijke rekenmethoden om de geluidsisolatie en de trillingsniveaus door lopen bij lichte bouwsystemen te voorspellen, in drie fasen.

Aanvullend onderzoek

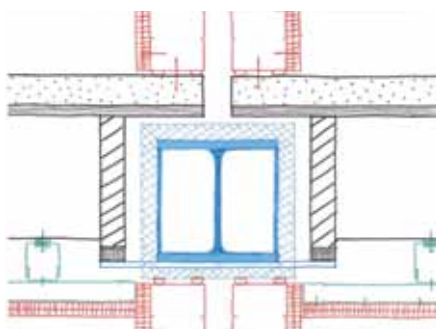
In de eerste twee fasen is gemeten aan laboratoriumopstellingen hoe goed de geluidsisolatie met de huidige modellen in NEN-EN 12354-1/2 kan worden voorspeld. Dezelfde vraag is onderzocht als het gaat om de kwaliteit waarmee de door lopen veroorzaakte trillingen met FEM-modellen kunnen worden voorspeld. In NEN-EN 12354-1/2 wordt

Bouwknop zonder geheimen

dr.ir. S.S.K. Lentzen

Sven Lentzen is onderzoeker trillingen en geluid bij TNO in Delft.

Oorspronkelijke constructeursschets van de bouwknop bij de woningscheiding.

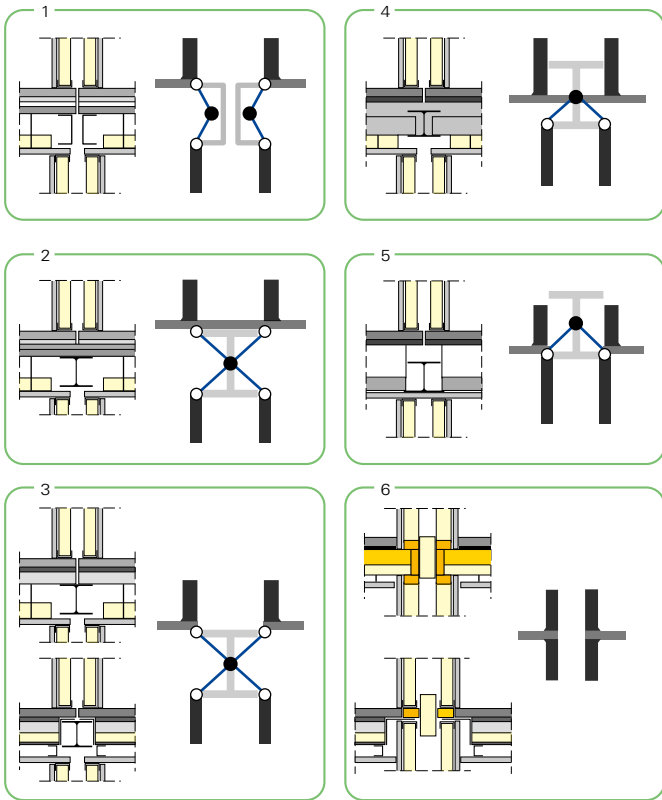


name dat de vloer uitsluitend resonantie kan vertonen als deze een eigenfrequentie heeft gelijk aan de eerste 'harmonische frequentie' van het lopen, dus de stapfrequentie. Deze aanname geldt tot op bepaalde hoogte voor zware vloeren, maar is zeker niet correct voor een lichte vloer (< 450 kg/m²). Een lichte vloer kan namelijk ook resoneren bij één van de hogere harmonischen van de stapfrequentie.

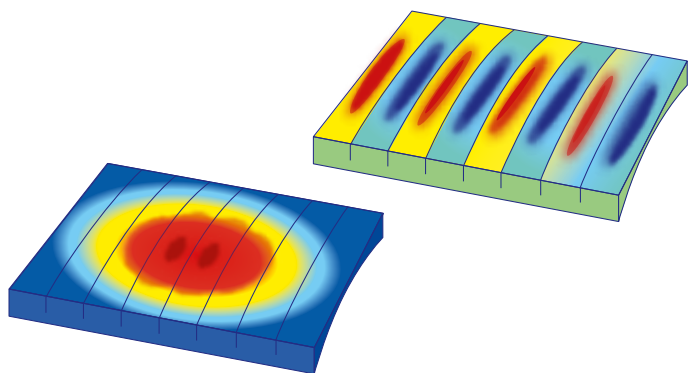
SBR-richtlijn complex

Een uitkomst biedt de SBR-richtlijn *Trillingen van vloeren door lopen*^[3]. De richtlijn beschrijft hoe met metingen, handberekeningen of complexe sommen via een eindige-elementenmodel (FEM, zie *kader p. 46*) de mate van trillingshinder kan worden bepaald en beoordeeld. Er is geen uitzondering met betrekking tot het gewicht van de vloer. Wel is kennis en kunde van de dynamica vereist, zeker als het gaat om het uitvoeren van een som met een FEM-model, vaak toch een drempel voor de keuze voor een licht bouwstelsel. Uit de marktbehoefte aan betrouwbare rekenmodel-

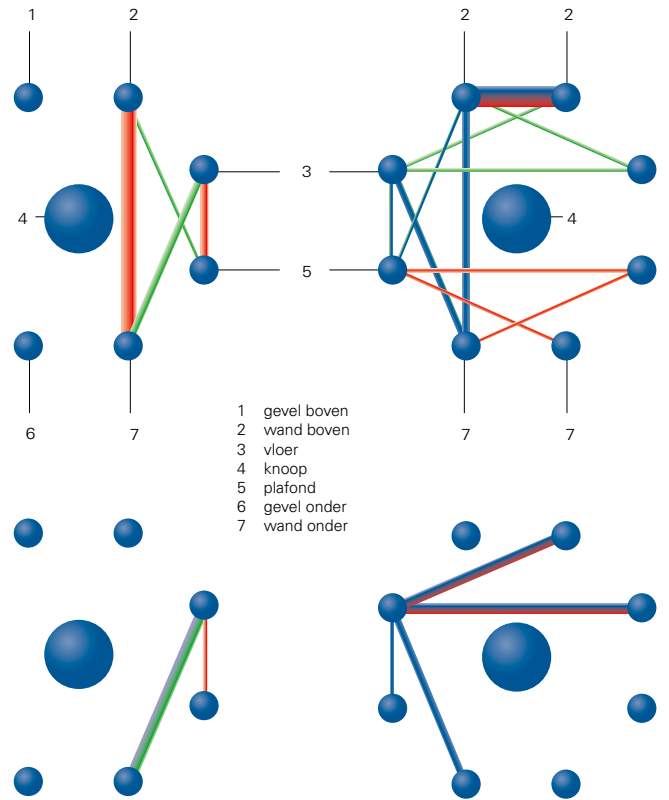
aangenomen dat het geluid wordt overgedragen via directe en flankerende paden van de ene naar de andere ruimte. Het verlies van geluidsenergie wordt per pad bepaald, enerzijds door het verlies gegenereerd in de bouw delen die het geluid passeert, anderzijds wordt het bij flankerende paden ook bepaald door het verlies in de bouwknop: de zogenaamde trillingsoverdrachtverzwakking K_{ij} (*afb. 4*). De verliezen in de bouw delen kunnen relatief eenvoudig worden voorspeld of gemeten. NEN-EN 12354-1/2 geeft voor verschillende situaties in de massieve monoliete bouw aan hoe K_{ij} voor alle paden kan worden aangenomen. Bij lichte bouwknopen moeten de K_{ij} -waarden worden gemeten of bepaald met statische-energie-analysemodellen (SEA, zie *kader p. 46*). Uit het onderzoek in de eerste twee fasen van het project is ten eerste geconcludeerd dat de schematisering uit NEN-EN 12354-1/2 van de geluidsoverdracht als model ook goed werkt voor de voorspelling van de geluidsisolatie in lichte bouwknopen. Ten tweede blijkt dat de K_{ij} -waarden ook bij com-



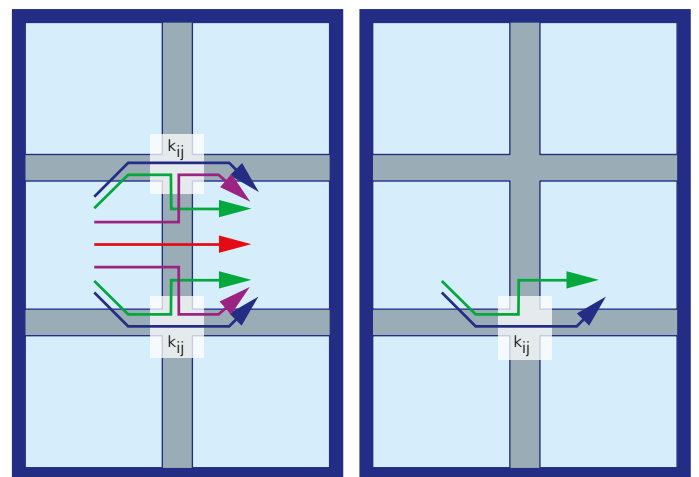
1. De voorgeschreven randvoorwaarden ter modellering van veel voorkomende lichte bouwsystemen worden in ingedeeld zes groepen. Een scharnierende koppeling wordt met een witte stip aangeduid, een kinematische koppeling met een blauwe lijn en een momentvaste koppeling met een zwarte driehoek.



2. Twee typische buigmodi waarin een lichte inhomogene vloer kan trillen. De linkermodi is een globale mode waarbij de toplaag samen met de liggers buigt. De rechtermodi is een lokale mode waarbij alleen de toplaag buigt.



3. De zogenaamde spin ter visualisering van de lucht- en contactgeluidsoverdracht tussen de bouwdelen die aan een lichte knoop zijn gekoppeld. De hoeveel overgedragen geluidenergie is weergegeven met de dikte van de verbindingslijnen.



4. Lucht- en contactgeluid wordt overgedragen via directe en flankerende paden. De flankerende paden verlopen via de bouwknop. De verzwakking in de knop wordt aangeduid als de trillingsoverdrachtverzwakking K_{ij} .

Tabel 1. Dampingstabel uit de SBR-richtlijn^[3]. De totale damping is een samengesteld effect van de damping uit het bouw materiaal, door het meubilair en door de afbouw ($\zeta = \zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3$).

| type | damping (% van kritische damping) |
|---|-----------------------------------|
| materiaaldamping ζ_1 | |
| hout | 6% |
| beton | 2% |
| staal | 1% |
| staal-beton | 1% |
| damping door meubilair ζ_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% |
| damping door afbouw ζ_3 | |
| plafond onder vloer | 1% |
| zwevende dekvloer | 1% |

FEM

In een FEM-model wordt de onderzochte constructie opgedeeld in kleine stukjes, de eindige elementen. Van elk element zijn de fysische eigenschappen bekend. De fysische eigenschappen van de gehele constructie wordt uiteindelijk bepaald door de assemblage van de eindige elementen waarmee de constructie is gemodelleerd. Omdat een FEM-model uit veel meer elementen bestaat dan het aantal componenten in een SEA-model (zie hieronder), kosten FEM-analyses meer rekentijd. Daartegenover staat dat FEM-modellen de realiteit gedetailleerder weergeven.

SEA

Een SEA-model bestaat uit componenten (zoals balken, platen en veren) die energie kunnen uitwisselen. De mate van uitwisseling hangt af van de manier van koppelen en van de geometrische en materiaaleigenschappen van de componenten. Met een SEA-model kan worden bepaald hoe de energie wordt verdeeld over de componenten. Hiermee kunnen de trillingsniveaus of de afgestraalde geluidsniveaus van de componenten worden bepaald.

Literatuur

1. *NEN-EN 12354-1* (Geluidwering in gebouwen – Berekening van de akoestische eigenschappen van gebouwen met de eigenschappen van de bouwelementen – Deel 2: Luchtgeluidisolatie tussen ruimten), 2000.
2. *NEN-EN 12354-2* (Geluidwering in gebouwen – Berekening van de akoestische eigenschappen van gebouwen met de eigenschappen van de bouwelementen – Deel 2: Contactgeluidisolatie tussen ruimten), 2000.
3. P.H. Waarts, *Trillingen van vloeren door lopen, Richtlijn voor het voorspellen, meten en beoordelen*, SBR, Rotterdam 2005.

plexe lichte bouwknope nauwkeurig zijn te bepalen met SEA.

Nauwkeurig, maar bewerkelijk

De aandacht voor het voorspellen van looptrillingen is vooral in de tweede projectfase gegroeid. Door het lage eigengewicht van lichte vloeren, behoren looptrillingen tot één van de aandachtsgebieden van lichte bouwknope. Fysisch speelt de overdracht van voelbare trillingen zich op een globaler niveau af dan de overdracht van het hoorbare geluid, vanaf 63 Hz. De geluidsoverdracht kan uitsluitend worden beïnvloed door lokale verandering, zoals het aanpassen van de spouwdiepte, van een wandelement of de aansluiting. De overdracht van voelbare trillingen worden echter ook beïnvloed door globale parameters, zoals het aantal verdiepingen of het aantal woningen per verdieping. Het is daarom niet meer voldoende om de overdracht van voelbare trillingen te schematiseren als een overdracht via ongekoppelde paden, die elk alleen afhankelijk zijn van de keuze van de bouwonderdelen en hun aansluitingen. Omdat bovendien de looptrillingen zich in een frequentiegebied afspelen waar de modale dichtheid (het aantal modi per frequentie) onvoldoende groot is, kunnen deze niet worden voorspeld met SEA-modellen. De richtlijn schrijft daarom voor om de looptrillingen van vloeren te bepalen met een FEM-model dat de hele constructie of een representatief deel ervan beschrijft. In de tweede fase van het project is gebleken dat de looptrillingen inderdaad nauwkeurig kunnen worden voorspeld met FEM-modellen. Het opstellen van een FEM-model is echter een zeer specialistische taak en mede daarom is de reproduceerbaarheid gering. Verder zijn de gebruikte FEM-modellen zo groot en gedetailleerd dat een trillingsanalyse ongeveer drie tot vier dagen rekentijd in beslag neemt.

Vereenvoudigingen

In juni 2010 is de derde en de laatste fase van het onderzoek afgerond. Hierin is onderzocht of de beschikbare modellen ter voorspelling van de geluidsisolatie en de looptrillingen in lichte gebouwen eenvoudiger kunnen en daarmee toegankelijker zijn voor de constructeur en de bouwfysisch adviseur. Voor

de rekenmethoden ter voorspelling van de geluidsisolatie is onder andere onderzocht of de relatief grote materiaaldemping van de lichte bouwdelen tot substantiële vereenvoudigingen van het model kan leiden. Over dit specifieke onderdeel is geconcludeerd dat de trillingsoverdrachtverzwakking K_{ij} niet hoeft te worden genormeerd op de 'equivalente absorptielengte'. Dit is een denkbeeldige lengte van een 100% absorberende zijde van een bouwdeel met een grensfrequentie gelijk aan 1000 Hz die dezelfde hoeveelheid geluidsenergie absorbeert als het bouwdeel in de onderzochte situatie. Hierdoor wordt het bepalen van de lastig in te schatten uitklinktijd T_s overbodig. Om de equivalente absorptielengte van een bouwdeel te bepalen, moet namelijk de uitklinktijd van dat bouwdeel bekend zijn. Het onderzoek en de conclusies bij de ontwikkelde rekenmethode voor de geluidsisolatie van lichte bouwsystemen zijn uitgebreid belicht in het tijdschrift *Bouwfysica* nummers 4 en 5 van dit jaar. Resumerend luiden de conclusies.

- Voor de voorspelling van de geluidsisolatie van lichte bouwsystemen kunnen de modellen uit NEN-EN12354/1-2 worden gebruikt. Ter vereenvoudiging kunnen de trillingsoverdrachtverzwakking worden genormeerd op het oppervlak en niet op de uitklinktijden.
- Isolatieverbeterende elementen zoals dekvloeren en voorzetwanden kunnen in het algemeen net als bij zware bouwmethoden in rekening worden gebracht met zogenaamde Δ -termen, de interactie tussen het basiselement en de verbetering, die in de modellering dus geen rol speelt.
- Het effect van dergelijke verbeterende elementen is voor flankerende overdrachtspaden kleiner dan voor directe paden. De betreffende Δ -termen moeten daarom worden gehalveerd bij flankerende paden.

Modellen homogeniseren

De FEM-modellen voor de analyse van de looptrillingen zijn op twee fronten aangepakt. Ten eerste is de complexiteit van de modellen drastisch verminderd door de modellen te homogeniseren. Een lichte vloer bijvoorbeeld of een lichte woningscheidende wand is een inhomogeen bouwdeel uit een toplaag die met

liggers of stijlen in de draagrichting is versterkt. Een gedetailleerd FEM-model kan zowel de globale trilmodi als de lokale trilmodi simuleren. In een globale mode trillen de toplaag en de verstijvingen als één geheel en bij een lokale mode trilt voornamelijk de toplaag (*afb. 2*) De eerste buigmode van de vloer (een globale mode) blijkt de belangrijkste mode te zijn bij het voorspellen van looptrillingen. De modi bij hogere frequenties en vooral de lokale modi zijn op hun beurt als fysisch fenomeen belangrijk bij het voorspellen van de geluidsisolatie. De globale eerste buigmode van een bouwdeel zoals een lichte vloer of een wand, kan ook goed worden voorspeld als deze is gemodelleerd als een sterk vereenvoudigde homogene orthotrope plaat.

De voor de eerste buigmode karakteristieke waarden (de massa en de buigstijfheid in zowel de draagrichting als de richting loodrecht hierop) van de homogene plaat moeten overeenkomen met die van de inhomogene vloer. Het detailniveau van de FEM-modellen kan nu zo drastisch worden teruggeschoefd dat een analyse van het model niet meer dan een uur duurt.

Demping, categorie en randcondities

Ook is de reproduceerbaarheid van de FEM-modellen aangepakt. De lage reproduceerbaarheid komt voornamelijk door twee factoren: de keuze van de dempingswaarden en de keuze van de koppel-/randcondities waarmee de (in dit geval gehomogeniseerde) bouwdeelen aan elkaar zijn gekoppeld. In de SBR-richtlijn staat een tabel (*tabel 1*) waarmee de totale demping van de constructie kan worden bepaald. Uit het onderzoek is gebleken dat deze waarden goed overeenkomen met de gemeten dempingswaarden van de laboratoriumopstellingen. Voor inzicht in de mogelijke randcondities bij een lichte bouwknoop is een overzicht gemaakt van alle gangbare lichte bouwsystemen in Nederland in zes categorieën, zie *afbeelding 1*. Een eenvoudig en reproduceerbaar FEM-model van een lichte bouwknoop bestaat dus uit drie stappen.

- Homogeniseren van de bouwdelen.
- Bepaling van de demping (uit SBR-richtlijn).
- Bepaling van de categorie waarbinnen de lichte bouwknoop valt, en daarmee ook van de randcondities.

Kennisoverdracht

Tijdens het onderzoek is ook een klankbordgroep uit constructeurs en bouwfysisch adviseurs samengesteld met als doel te bepalen in welke vorm de gegenereerde kennis moet worden gegoten om de doelgroep efficiënt te informeren.

In de eerste plaats is er bepaald dat de kennis binnenkort wordt gebundeld op www.lichterbouwen.nl in de vorm van theoretische achtergrondinformatie en via een handleiding voor de modellering ter analyse van de geluidsisolatie en de looptrillingen van vloeren. Daarnaast zijn geluidsisolatie- en trillingsanalyses van vier verschillende lichte bouwknoopen gemaakt met de ontwikkelde modellen. Behalve de invoerparameters van de modellen, zijn ook de uitkomsten van de analyses op verschillende niveaus weergegeven. Zo zijn voor architecten de resultaten van de geluidsisolatieanalyses overzichtelijk weergegeven met ééngetalswaarden $D_{nT,A}(I_{lu;k})$ en $L_{nT,A}(I_{co})$. Voor de adviserende en de modellerende bouwfysicus zijn de resultaten gedetailleerd per overdrachtspad weergegeven. Voor snel en duidelijk overzicht van deze informatie is de 'spin' bedacht. Hierruit is direct af te lezen wat de kritische paden zijn en waar eventuele verbeteringsmogelijkheden liggen (*afb. 3*). Deze manier van weergave vindt reeds weerklank op Europees niveau. De resultaten van de trillingsanalyses worden gepresenteerd met 'ES-RMS₉₀-waarden': het trillingsniveau van een vloer dat in 90% van alle gevallen niet wordt overschreden. Deze waarden gelden uitsluitend in situaties waarbij het gebouw uit twee vloeren van 5x5 m bestaat gescheiden door één woningscheidende knoop. Zoals eerder aangeduid: het trilgedrag hangt af van globale parameters én het aantal verdiepingen. De resultaten zijn daarom ook illustratief en gelden niet meer zodra de constructie afwijkt van de voorheen vermelde afmetingen en configuratie. •