

Trillingsisolatie op een lichte draagconstructie

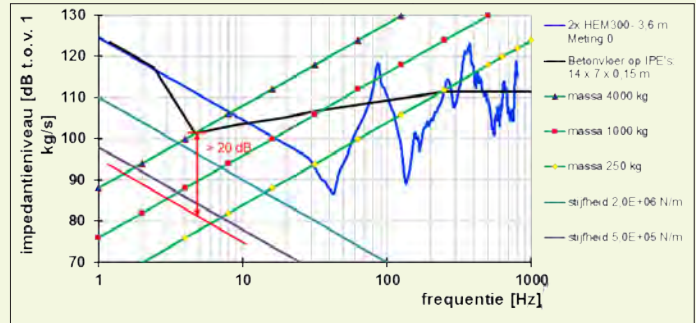
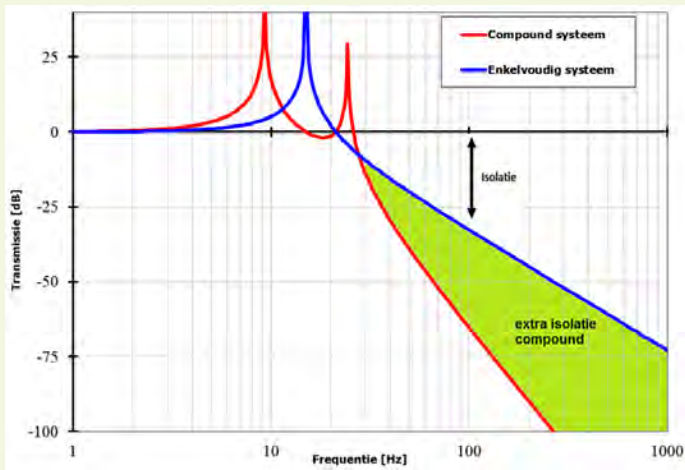
Beheersing van door apparaten uitgestraalde luchtgeluid én trillingen is vereist om deze succesvol te integreren in een gebouw. Bij voorkeur past men geluids- en trillingsarme apparaten toe, aangevuld met daarop afgestemde isolerende voorzieningen. Luchtgeluidisolatie is inmiddels gemeengoed, trillingsisolatie ervaart men daarentegen regelmatig als complex. De effectiviteit hiervan is soms teleurstellend, zijnde sterk afhankelijk van o.a. de ondersteuningsconstructie voor de isolatoren. Dit artikel schetst de randvoorwaarden voor een optimale trillingsisolatie en bepleit een rationele aanpak zoals in het technisch ontwerp van andere kapitaalgoederen al wel wordt toegepast. Verder wordt een recent gereed gekomen project gepresenteerd.

Ing. B. (Bart) van der Graaf, ing. H. (Huub) Neuteboom;
installatiegeluidspecialisten,
DGMR Bouw B.V.

Maatregelen bij de bron zijn het meest effectief en efficiënt. Voor de isolatie van luchtgeluid dat door een apparaat wordt uitgestraald, wordt steeds vaker een omkasting toegepast. Voor ventilatoren kennen we de luchtbehandelingskasten (groot), 'behuizingen' van mechanische afzuigventilator en WTW-apparaten'. Ook andere apparaten, zoals bijvoorbeeld koelmachines, warmtepompen en cv-ketels worden voorzien van omkastingen en zijn, weliswaar fabricaat afhankelijk, stiller geworden. Het installeren in een gebouw vraagt in dat geval minder bijzondere bouwkundige voorzieningen, wat de snelheid van de bouw verhoogd. Onder bepaalde voorwaarden kan dan namelijk volstaan worden met een licht wandsysteem. Berekeningen aan luchtgeluidkwesties zijn redelijk eenvoudig uit te voeren. De benodigde gegevens qua bronsterkte en geluidisolatie zijn veelal voorhanden. Ontwerp van optimale trillingsisolatie is complexer dan luchtgeluidisolatie. Directe aan-

stoting van een bouwkundige constructie met apparaat-trillingen (=constructiegeluid) levert in vergelijking met de luchtgeluidbronsterkte van datzelfde apparaat, tot op grotere afstand in het gebouw, hoorbaar installatiegeluid. De trillingsbronsterkte van een apparaat is dan ook fors hoger dan de luchtgeluid-bronsterkte. Met de norm NEN EN 12354-5 [1] is overdracht van trillingen modelmatig vastgelegd, weliswaar in complexe fysische termen. Deze norm omschrijft het model voor trillingsoverdracht van een apparaat-opstelling in een gebouw naar een geluidgevoelige ruimte, de bepaling van de 'bronsterkte' én de akoestische stijfheid van trillingsisolatoren. Bij de lancering van deze Europese norm is echter vastgesteld, dat onder andere het beschikbaar krijgen van genormaliseerde prestaties van 'trillingsbronnen' en isolatoren, maar vooral ook de trillingsoverdrachtsfuncties van bouwkundige constructies, nog wel (vele) jaren op zich zal laten wachten. In Nederland is al vanaf

midden zeventiger jaren aan de ontwikkeling van rekenmodellen voor trillingsoverdracht in gebouwen en schepen gewerkt. Als vroege toepassing zijn te noemen de Novem-handleiding 'Geluidbestrijding van in pandig opgestelde warmte/krachtinstallaties' [2]. Deze handleiding is iets praktischer van opzet, maar hanteert in het model dezelfde 'interfaces' (posities en fysische parameters) tussen de 'bron', het 'overdrachtspad' en de 'ontvang'-ruimte als in de NEN-EN norm. Equivalent is de aanpak voor schepen als beschreven in 'Multi-path sound transfer from resiliently mounted shipboard machinery' [3]. De constructiegeluid(trilling)bronsterkte is de trillingsterkte op de opstelpunten en, indien van toepassing, de leidingaansluitingen van het apparaat. Er bestaat grote variatie in bronsterkte bij vooral grotere koelmachines en warmtepompen, met gelijke werkingsprincipes van de compressoren. Niet in de laatste plaats omdat basale interne trillingsisolatie en/of de



-Figuur 2- Impedantie van een betonnen vloer, isolatorstijfheden, massablokken en een HEM300-balk

<-Figuur 1- Grafische presentatie van de isolerende werking van een enkelverende en dubbelverende ('compound') trillingsisolerende opstelling

daartoe vereiste optimale constructieve opzet, maar ook pulsatiedempers niet aanwezig zijn. Met enige kennis van het apparaat kunnen de belangrijkste stoofrequenties (in Hz) van een apparaat vaak wel afgeleid worden. Lastiger is het de bijbehorende bronsterkte (in dB) te schatten. Meetresultaten hebben daarom altijd de voorkeur. Als er geen databankgegevens van de bronsterkte beschikbaar is (geen eerdere toepassing/ervaring), wordt bij de opzet van een trillingsisolerende (verende) opstelling vaak een pragmatische maar steeds een conservatieve/veilige benadering gevolgd.

Voorbeeld: bij een opstelling op een massieve betonnen vloer kan meestal nog volstaan worden met een enkelverende opstelling en een betrekkelijk lage afveerfrequentie. Als echter opgesteld moet worden op een lichte draagconstructie, kan het ontbreken van de trillingsbronsterkte én de impedantie van de constructie een akoestische berekening nodig maken.

De trillingsoverdracht van isolatoren (akoestische stijfheid) wordt bepaald door de dynamische stijfheid en de staande golven (resonanties) in het elastisch materiaal. Sterk mede bepalend voor de te bereiken isolatie is echter de impedantie (=weerstand tegen trillingen) van de ondersteunende constructie. Hoe hoger de impedantie van de ondersteuningsconstructie (fundatie) is, hoe lager de overgedragen trillingsenergie. Deze impedantie is een complexe, frequentieafhankelijke, grootte en wordt bepaald door de interactie van massa, stijfheid en inwendige demping (het modaal gedrag) van de ondersteuningsconstructie, onder te verdelen in de 'lokale' fundatie (poeren/opstort op vloerveld of draagbalken) en de hoofdtraagconstructie. De volgende constructievarianten worden in dit verband onder een 'lichte draagconstructie' geschaard: frames opgebouwd uit stalen balken, een dunne staalplaat-betonvloer en dergelijke. Om de risico's van de lichte draagconstructie in beeld te brengen, moet de

ligging van de diverse eigenfrequenties én de puntimpedantie op de ondersteuningspunten bepaald worden. In plaats van een enkelverende opstelling wordt dan vaak ook voor een dubbelverende (compound) opstelling gekozen. Hierbij voegt men onder het apparaat met de enkel verende opstelling een extra massaveersysteem, gevormd door een tussenmassa die ook weer ondersteund wordt door, veelal slappe, isolatoren. Figuur 1 toont de sterk frequentieafhankelijke isolatie van beide typen trillingsisolerende opstellingen.

PRINCIPE TRILLINGSISOLATIE

De effectiviteit van trillingsisolatie is vooral kritisch in het frequentiegebied onder circa 500 Hz. Dit komt enerzijds door de nog slechts beperkte isolatie van een isolerende opstelling bij lage frequenties en anderzijds door het risico van resonanties en onvoldoende demping in de ondersteuningsconstructie. Dit laatste bepaalt in sterke mate de impedantie van de ondersteuningsconstructie. Figuur 2 toont de frequentieafhankelijke impedantie van een draagvloer, isolatorstijfheden, massablokken en een stalen HEM300-balk op een overspanning van 3,6 m. Om een optimale trillingsisolatie te bereiken moet de impedantie van de ondersteuningsconstructie tenminste een factor 10 (impedantie-'sprong' is 20 dB) hoger zijn dan de stijfheid van de isolator, bij de ongunstigste frequentie: van de fundatie-impedantie en/of resonantie in de isolator. In de praktijk zal de vereiste impedantiesprong, en daarmee de eis aan de ondersteuningsconstructie, veel hoger zijn dan de hiervoor genoemde factor 10. Dit kan berekend worden met het Novem-rekenmodel [2], waarin beide frequentieafhankelijke parameters ingevoerd kunnen worden. Als een stoofrequentie uit het apparaat (bronsterkte) samenvalt met een weinig gedempte eigenfrequentie in een isolator en/of van de draagconstructie, levert dit een forse opslingering (resonantie) van de trillingsterkte in de draagconstructie op. Bij die

frequentie wordt de trillingsisolatie dan sterk gereduceerd of zelfs nihil.

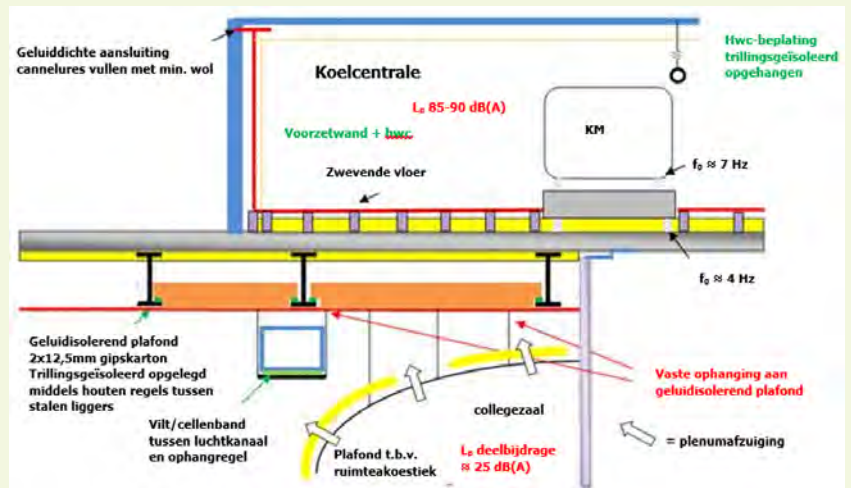
Voorbeeld: figuur 2 toont de gemeten puntimpedantie van een stalen HEM-balk opgenomen in een stalen balkenvloer, voor het verend opstellen van een zwaar apparaat. De HEM-balk vertoont lage puntimpedanties bij 42 Hz en 136 Hz, zijnde eigenfrequenties van de ondersteuningsbalk. Bij 88 Hz is er sprake van een hoge impedantie, bedoeld om bij de stoofrequenties tussen 90 Hz en 100 Hz een maximale weerstand tegen trillingen te bieden. Uiteraard is een 'lichte' draagconstructie een relatief begrip en moet dit in verhouding gezien worden tot de stijfheid van de isolator en daarmee, indirect, de massa van het te isoleren apparaat. Een rationeel ontwerp betreft dan ook het kiezen van een isolatorstijfheid die afhankelijk is van de bronsterkte en het toerenal van het apparaat en een daarop afgestemde stijfheid en massa van de ondersteuningsconstructie. Ook het bewust kiezen van de posities van de steunpunten voor de isolatoren op deze 'lichte' draagconstructie en de verdere integratie in de hoofdtraagconstructie van het gebouw, zijn van belang. Een dergelijke ontwerpkeuze kan voor oplossingen tot circa 70 Hz in een Eindige Elementen Methode (EEM)-rekenmodel doorgerekend worden. In de praktijk zal men vaak een pragmatische, maar steeds een conservatieve/veilige benadering willen volgen. In bijzondere gevallen (hoge bronsterkte en lichte draagconstructie) dient bij voorkeur een analytische specialistische studie (EEM) uitgevoerd te worden. Voor hogere frequenties (>70 Hz) is een empirisch rekenmodel volgens de Novem-handleiding toepasbaar. Voor beide berekeningsstappen, EEM en Novem, is een prognose alleen mogelijk als de bronsterkte van het constructiegeleid bekend is, dan wel redelijk betrouwbaar geschat kan worden. Zoals met elk specialisme vraagt dit om gerichte kennis¹⁾ en ervaring aangevuld met metingen, ter verificatie van de rekenmodellen, om nauwkeurige resultaten te

verkrijgen.

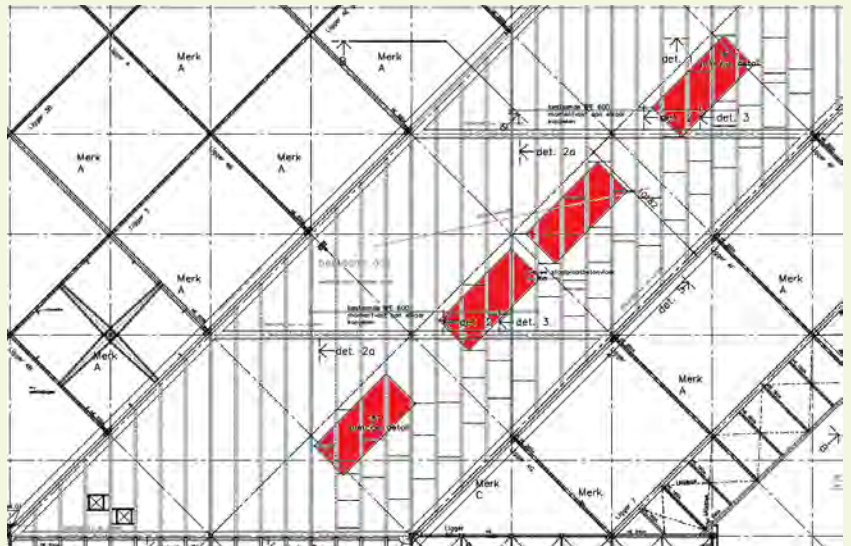
Een dergelijke ontwerptechnische aanpak is voor diverse kapitaalgoederen, zoals materieel voor personen en goederenvervoer (weg- en railverkeer), lucht- en ruimtevaart en militaire voer- en vaartuigen, reeds algemeen gebruik geworden. De motieven zijn daar het besparen van materiaal, het voorkomen van schade door vermoeiing en schokbelasting, maar geschiedt zeker ook uit hoofde van comfortoverwegingen en vermindering van detectiekans (militair materieel). Het kostenmotief wordt daar ook ingegeven door de seriegrootte van de productie. In die branches is dan ook al een breed aanbod van specialisten beschikbaar die met de juiste tools oplossingen uitwerken. Met de voortdurende behoefte aan kosten- en ruimtebesparing enerzijds en de introductie van allerhande technische apparaten in gebouwen anderzijds, komen dergelijke kwesties nu ook vaker aan de orde in de woning- en utiliteitsbouw. Ook in deze bouwbranches vereist het kunnen adviseren op dit type kwestie, vakkenis van zowel de typische trillings-signatuur van de bron, de akoestische stijfheid van isolatoren, het dynamisch gedrag van de constructie (de lokale draagconstructie én de hoofd-draagconstructie) als ook de ruimteakoestiek bij de ontvanger. De beschikbare rekentools moeten deze 'actoren' op een akoestisch juiste manier kunnen koppelen, om tot een optimaal ontwerp te komen.

■ VOORBEELPROJECT

Bij de grootschalige renovatie van het Onderwijs centrum (OC) bij het Erasmus Medisch Centrum te Rotterdam is de koelinstallatie van de gehele campus ingebouwd in een nieuwe techniekruimte (TR) direct boven de collegezalen; in totaal een zeer uitgestrekte zone van geluidgevoelige ruimten in dit gebouw. In de TR zijn onder andere vier grote koelmachines (KM's) opgesteld, met elk een massa van 22.7 ton en een koelcapaciteit van in totaal maximaal 3.500 kW. Figuur 3 toont schematisch de KM-opstelling en opbouw van de vloerconstructie tussen TR en collegezaal, zijnde een nieuwe staalplaat-betonvloer, ondersteund op stalen IPE 600-liggers met een hart-op-hart afstand van 1,8 m. Figuur 4 toont het constructieschema met de opstelposities. De vrije overspanning van de IPE's bedraagt circa 14 m (gelijk aan de breedte van een collegezaal). De IPE-liggers zijn kops gekoppeld aan dezelfde hoge vakwerkliggers die het complete bouwwerk overspannen (circa 42 m). Op diverse plaatsen zijn de stalen IPE-liggers zijdelings onderling gekoppeld met HE320A- en HE200A-liggers om steunpunten onder de apparaat-opstellingen te vormen. Onder de staalplaat-betonvloer is een geluidsisolerend



-Figuur 3- Schematische doorsnede van de koelcentrale boven de collegezalen



-Figuur 4- Plattegrond van dakvloerconstructie incl. positie koelmachines (rood): IPE draagbalken in breedte richting van de collegezalen

plafond gerealiseerd (tweelaags gipskarton), trillingsgeïsoleerd gemonteerd aan de vloerconstructie. Het akoestische plafond ten behoeve van de ruimteakoestiek in de collegezaal is weer opgehangen aan het geluidsisolerende plafond onder de vloer.

■ AANDACHTSPUNTEN ONTWERP

Voor de luchtgeluidbeheersing konden geen geluidsisolerende omkastingen over de grote geluidsbronnen toegepast worden, omdat dit een extra massalast tot gevolg zou hebben. Dit resulteerde in een betrekkelijk hoog installatiegeluidniveau in de TR. De complicerende factoren voor de constructiegeluid (trillings-)beheersing, betroffen:

- de relatieve lichte bouwkundige vloer (massa circa 314 kg/m²) in de TR, met betrekkelijk lage laagste eigenfrequentie (f_0) van circa 3 à 5 Hz en dito hogere orden (als veelvoud $n=1,2,3,\dots$ n -maal de f_0) en een lage inwendige demping van de stalen profielen;
- de beperkte impedantie van de vloer onder

de isolatoren in verhouding tot de grote massa van de KM's;

- het ontbreken van gegarandeerde trillingsbronsterkte op de opstelposities van de KM's (compressor toerental circa 47 Hz).

Bij onjuiste keuze qua trillingsisolerend systeem kan dit trillen/rammelen ('rattle noise') van de afgehangen plafondconstructie en lichtarmaturen, een (te) hoge installatiegeluid bijdrage in de geluidgevoelige ruimten tot gevolg hebben.

■ OPLOSSINGEN

Qua luchtgeluidbeheersing is gekozen voor een 'bouwkundige' oplossing, zijnde een doos-in-doos principe, uitgevoerd in lichte (plaat) materialen. Alle wanden en het plafond zijn voorzien van een geluidsisolerende voorzetbeplating met in de spouw geluidabsorptiemateriaal, voorzien van een geluidsabsorberende afwerking in de TR. Verder is een zwevende vloer aangebracht, met sparringen voor de betonplaten als onderdeel van de trillingsisolerende opstelling van de grote apparaten. Als

extra geluidsisolerende schil is onder de lichte draagvloerconstructie een geluidsisolerend plafond aangebracht. Dit plafond is met een houten hulpdraagconstructie trillingsgeïsoleerd opgehangen aan de stalen TR/vloerliggers.

Ter beheersing van de overdracht van constructiegeluid (trillingen) is er in de definitief ontwerp (DO) fase voor gekozen om de KM's dubbel verend (compound) op te stellen. Algemeen gesteld betreft dit het trillingsgeïsoleerd opstellen van elk van de KM's op een massieve betonnen vloerplaat. Deze vloerplaat is ook weer trillingsgeïsoleerd opgesteld op de staalplaat-betonvloer in de TR.

In verband met hoogtebeperking is de onderste laag trillingsisolatoren opgenomen in de dikte van de betonnen plaat. De impedantie van de draagconstructie onder deze isolatoren wordt gevormd door de 1,8 m lange HE320A respectievelijk HE200A stalen balken, die weer opgenomen zijn in de flanken van de IPE-liggers. In de uitwerkingsfase bleef onzekerheid bestaan over de bronsterkte en is er niet gekozen voor een gedetailleerde EEM-studie van de draagvloerconstructie. Om die reden zijn de isolatorstijfheden, met name onder de KM's, nog lager (slapper) gekozen dan initieel in de DO-fase geselecteerd was. Bij een onverhoopt tegenvallend praktijkresultaat zouden er nog slappere isolatoren gekozen kunnen worden in de bovenste laag isolatoren (tussen KM en betonplaat). Figuur 5 toont een foto van de opstelling van een KM; één van deze trillingsisolatoren van de 'compound'-opstelling is zichtbaar.

RESULTAAT

De koelcentrale heeft gedurende het studiejaar 2014-2015 geen geluidklachten van onderwijzend personeel en/of studenten opgeleverd. In de zomer van 2015 zijn er vollastbeproevingen uitgevoerd, waarbij ook geluids- en trillingsmetingen uitgevoerd zijn. De resultaten tonen aan dat het gemeten geluid als gevolg van de in werking zijnde KM's ruim voldoet aan de gestelde ontwerp eis, zijnde 30 dB(A). De primaire stoofrequentie van de KM's (circa 47 Hz) is niet herkenbaar in het gemeten geluidsspectrum. Trillingsmetingen boven en onder de primaire trillingsisolator tonen aan dat de theoretisch verwachte isolatie van deze veer gerealiseerd wordt.

De gemeten bronsterkten van het constructiegeluid zijn ingevoerd in het Novem-rekenmodel. Hieruit volgt een berekende installatiegeluidbijdrage van de KM's als gevolg van de overdracht van constructiegeluid-, dus via de trillingsisolatoren, van in totaal 18 dB(A) per KM. De gesommeerde installatiegeluidbijdragen van de KM's via de trillingsisolerende

opstelling laat voldoende ruimte tot de ruimtegeluidseis. Het totale installatiegeluid van de KM's omvat ook nog de lucht- en constructiegeluidoverdracht via de leidingaansluitingen. Uit de schakelproef met de overige apparaten, luchtbehandelingskasten apart en in combinatie met de koeltorens, is aangetoond dat de eis van 30 dB(A) met de vier stuks koelmachines niet overschreden wordt.

Hiermee wordt geconcludeerd dat de wijze van opstelling van de KM's op de lichte ondersteuningsconstructie voldoet. De impedantie van de lichte (vloer)draagconstructie ter plaatse van de gekozen veerposities blijkt voldoende hoog om effectieve trillingsisolatie te bewerkstelligen in dit geval gerealiseerd door de toepassing van een dubbelverende opstelling met slappe trillingsisolatoren.

SAMENVATTEND

Trillingsisolatie op een lichte draagconstructie is niet eenvoudig te realiseren. Voor een optimale werking van de isolator moet de mechanische puntimpedantie van de draagconstructie veel hoger zijn dan die van de isolator. De impedantie van de draagconstructie wordt in het algemeen bepaald door de massa en stijfheid van de constructie, bepalend voor de ligging van de eigenfrequenties van de draagconstructie, en de inwendige materiaaldemping. Zoals bekend hebben stalen constructie-onderdelen helaas een lage inwendige demping. Bij het op een lichte draagconstructie aanbrengen van een 'zwaar' apparaat veranderen verder ook de eigenfrequenties. Als eigenfrequenties van de draagconstructie samenvallen met stoofrequenties uit het apparaat, kunnen onverwacht hoge installatiegeluidbijdragen verderop in het gebouw optreden.

Voor een dergelijke kwestie kan men een installatiegeluidspecialist met voldoende kennis en ervaring van dynamisch gedrag van de bouwkundige constructie, inschakelen. Deze zal ten eerste het risico van de interactie



tussen de bron (signatuur) en dynamica van de constructie inventariseren. Daarvoor moet deze kunnen beschikken over de juiste reken-tools om de dynamica van de draagconstructie (EEM) mede belast met het apparaat, én de constructiegeluidsoverdracht naar verderop gelegen ruimten te kunnen modelleren. Alleen dan kan een optimale, zowel effectieve als efficiënte, oplossing gevonden worden. Al naar gelang de specifieke details van zo'n kwestie kan op basis van een pragmatisch inschatting, dan wel een nadere specialistische studie, gekomen worden tot specificatie van de isolatiemaatregelen. Daarbij is het de keuze om een enkel- dan wel dubbelverende (compound) opstelling toe te passen.

Bij de inbouw van de vier stuks koelmachines in het Erasmus Onderwijs Centrum is in de ontwerp fase geen gedetailleerde EEM-model van de vloer en de zware apparaten doorgerekend. Om die reden is er gekozen voor een dubbelverende opstelling met slappe isolatoren voor beide isolatieniveaus: direct onder de KM's én onder de zware tussenmassa. Deze pragmatische aanpak werd verantwoord geacht door de betrekkelijk hoge stoofrequentie en het werkingsprincipe van de compressor: centrifugaal drukverhoging.

De TVVL cursus 'Geluid in Technische installaties' biedt de gelegenheid voor nadere verdieping in deze materie. Verder komt ook geluidsoverdracht via ventilatiekanalen en geluiduitstraling naar de (woon)omgeving in deze cursus aan de orde.

REFERENTIES

1. Geluidwering gebouwen – Berekening van de akoestische eigenschappen van gebouwen met de eigenschappen van de bouwelementen – Deel 5: Geluidniveau veroorzaakt door installaties, NEN-EN 12354-5/C1 basis norm april 2009 met correctieblad 5/C1 oktober 2010
2. Handleiding geluidbestrijding van in pandig opgestelde warmte/kracht installaties, Novem publicatie opgesteld door Technische Fysische Dienst (TNO-TH), 1990
3. Multi-path sound transfer from resiliently mounted shipboard machinery, promotie dr.ir. J.W. Verheij Technisch Fysische Dienst (TNO-TH), mei 1982

1): Dit vakspecialisme wordt gedoceerd in de PHBO-opleiding 'Geluid in technische installaties van TVVL', de PAO cursus Bouwakoestiek, de Hogere Kursus Akoestiek Antwerpen maar ook aan de TU-Eindhoven-Werktuigbouw, afstudeervak Geluidarm construeren.

-Figuur 5- opstelling van een KM; één van de trillingsisolatoren is zichtbaar