

Ontwerp van trillingreducerende constructies in gebouwen voor nanotechnologie en soortgelijke gevoelige laboratoria

ir. Basjan Snoeij
ir. Martijn Vercammen
Peutz bv
Postbus 696, 2700 AR Zoetermeer
email: b.snoeij@zoetermeer.peutz.nl

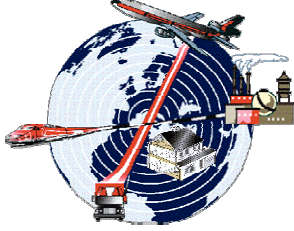
1. Inleiding

In diverse onderzoeksinstituten en industriële projecten wordt gebruik gemaakt van technologisch hoogwaardige instrumenten die gevoelig zijn voor trillingen. Door ontwikkelingen in onderzoeksgebieden als optica, micro-elektronica, lithografie, biofysica en nanotechnologie worden steeds hogere eisen gesteld aan de prestaties van de gebruikte apparatuur. Optredende trillingen in de vloeren beperken in toenemende mate de prestaties van de apparatuur. De trillingen worden veroorzaakt door bronnen in de omgeving van de apparatuur, zowel binnen het gebouw als daarbuiten (zie figuur 1).

Bij nieuwbouw van onderzoeksinstituten en industriële projecten worden ontwerpende partijen vaker geconfronteerd met het gebruik van trillinggevoelige apparatuur en de strenge eisen die gesteld worden ten aanzien van de trillingniveaus van de vloeren waar deze apparatuur wordt opgesteld. Door in een vroeg stadium rekening te houden met de trillingproblematiek, kan het gehele gebouwoontwerp hierop worden afgestemd.



Figuur 1 De prestaties van trillinggevoelige apparatuur worden nadelig beïnvloed door optredende trillingen veroorzaakt door trillingbronnen in de (directe) omgeving van de apparatuur, zowel binnen als buiten het gebouw.

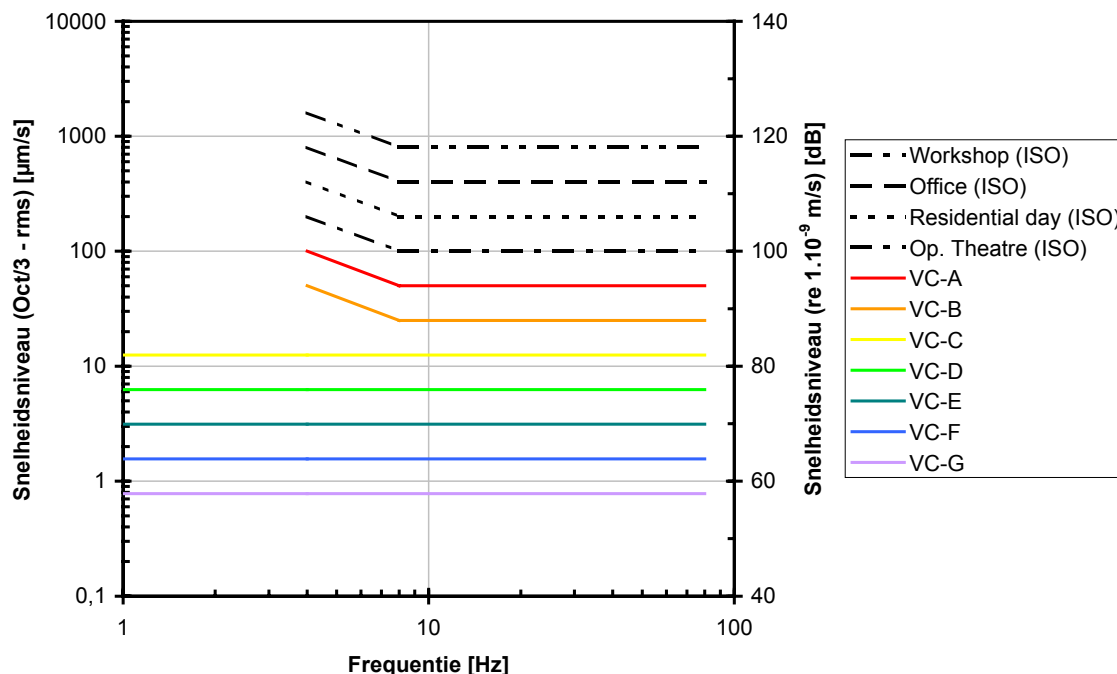


Om te komen tot een voor het beoogde gebruik passend gebouwtwerp dienen een aantal stappen gevolgd te worden. Achtereenvolgens komen de volgende aspecten aan de orde:

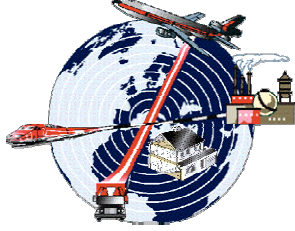
- opstellen van de prestatie-eisen (toelaatbare trillingniveaus);
- inventarisatie van relevante trillingbronnen;
- prognose van trillingniveaus;
- ontwerp van trillingreducerende voorzieningen.

2. Prestatie-eisen inzake toelaatbare trillingniveaus

Bij het opstellen van de prestatie-eisen ten aanzien van toelaatbare trillingniveaus in de vloeren kan worden uitgegaan van een specifiek apparaat. Echter, voor een veelzijdig gebruik van het gebouw verdient het de voorkeur om de prestatie-eisen te formuleren met algemene criteria die voor bepaalde groepen apparatuur van toepassing zijn. Dit maakt een meer flexibel gebruik van het gebouw mogelijk, alsook een eenduidige vergelijking met andere laboratoria. Kwalificatie van opstellingsvloeren kan bijvoorbeeld geschieden middels de zogenaamde VC-curven (*Vibration Criteria*) [lit. 1,2], waarmee de geschiktheid van de vloer voor een zeker toepassingsgebied kan worden aangegeven (zie figuur 2).



Figuur 2 Toelaatbare trillingniveaus (Vibration Criteria): VC-curven A tot en met G.



Voor een zeker toepassingsgebied (proces, onderzoeksgebied of detailgrootte) kan globaal een toelaatbaar trillingniveau ofwel een VC-curve worden aangegeven (zie tabel 1). Hierbij is uitgegaan van de meest trillinggevoelige apparatuur die wordt gebruikt binnen dat zekere toepassingsgebied. Daarmee kan worden gesteld dat zodra aan een zeker criterium wordt voldaan, nagenoeg alle apparatuur binnen dat toepassingsgebied op de betreffende vloer kan worden geplaatst en gebruikt.

Toepassingsgebied	Criterium curve	Detailgrootte
Algemeen laboratorium, optische microscopie, epitaxy	VC-A	8 μm
	VC-B	3 μm
	VC-C	1 μm
Fotolithografie, nanofabricage	VC-D	0,3 μm
	VC-E	0,1 μm
Metrologie, oppervlakte karakterisatie, SEM, SPM, AFM, TEM, FIB	VC-F	30 nm
	VC-G	10 nm

Tabel 1 Toepassingsgebieden in relatie tot trillingcriteria.

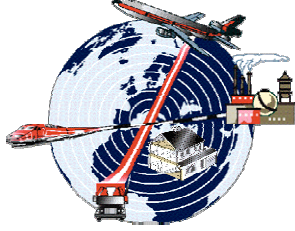
3. Inventarisatie van relevante trillingbronnen

Voor de inventarisatie van trillingbronnen die van belang kunnen zijn, worden de volgende categorieën onderscheiden:

- omgevingsgebonden trillingbronnen, zoals autoverkeer, spoorwegen, omliggende industrie, natuurlijke achtergrondtrillingen;
- gebouwgebonden trillingbronnen, zoals werktuigbouwkundige en elektrotechnische installaties, transportinstallaties;
- gebruiksgebonden trillingbronnen, zoals veroorzaakt door menselijke activiteiten, opgestelde apparatuur en machines.

Een goede inventarisatie van de relevante trillingbronnen is noodzakelijk om tot een afgestemd pakket maatregelen te komen (zie figuur 3).

De relevantie van een trillingbron wordt enerzijds bepaald door de aard van de bron of het veroorzaakt trillingniveau en de aard van de trillinggevoelige opstelling of het toelaatbaar trillingniveau, anderzijds door de reeds beschikbare trillingreductie door bijvoorbeeld de afstand. In veel situaties zijn gebouwgebonden trillingbronnen en gebruiksgebonden trillingbronnen maatgevend. Zodra echter sprake is van (zware) trillingbronnen in de omgeving op relatief korte afstand, kunnen deze (mede)bepalend worden voor het uiteindelijke trillingniveau in de laboratoria. Tevens kan er sprake zijn van specifieke



titel lezing
Ontwerp van trillingreducerende constructies in gebouwen voor nanotechnologie en soortgelijke gevoelige laboratoria

bladzijde
4/13

trillingbronnen op grotere afstand, bijvoorbeeld scheepvaartverkeer of industrieën gefundeerd op eenzelfde zandlaag.

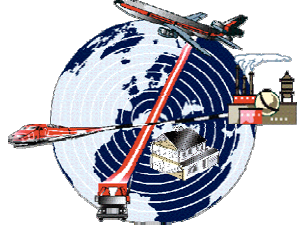


Figuur 3 Voorbeelden van trillingbronnen zoals zware industrie in de omgeving (links), een procesgebonden heliumcompressor (midden) of de luchtbehandelingsinstallatie (rechts).

In de loop der tijd kunnen ontwikkelingen in de omgeving leiden tot te hoge trillingniveaus in de vloeren van de laboratoria. De komst of uitbreiding van industrieën, bouw- of sloopactiviteiten in de omgeving of intensiever gebruik van infrastructuur of uitbreiding daarvan kunnen voor een bestaande situatie problematisch zijn (zie figuur 4). Door tijdig maatregelen te treffen kunnen problemen worden voorkomen.



Figuur 4 Bouwnijverheid in de omgeving van een laboratorium kan gepaard gaan met intensief vrachtverkeer en hei- of trilwerkzaamheden.



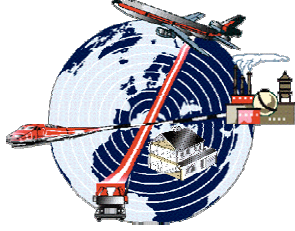
4. Prognose van trillingniveaus

Nadat een inventarisatie van de relevante trillingbronnen is opgesteld, wordt het te verwachten trillingniveau geprognoseerd voor de verschillende trillingbronnen. Dit kan voor algemene bronnen geschieden op basis van ervaringsgegevens (zie tabel 2).

Trillingbronnen	L_v	Trillingniveau [dB re 10^{-9} m/s]						
		VC-A	VC-B	VC-C	VC-D	VC-E	VC-F	VC-G
		94	88	82	76	70	64	58
Omgeving								
- TU Delft, nacht	55	-	-	-	-	-	-	-
- Leiden, avond	55	-	-	-	-	-	-	-
- UT Enschede, overdag	60	-	-	-	-	-	-	-
- TU Delft, overdag	70	-	-	-	-	-	6	12
- wegverkeer op 5 m	75	-	-	-	-	5	11	17
- railverkeer op 15 m	105	11	17	23	29	35	41	47
Gebouw								
- schroefkoelmachine, LBK (< 50.000 m ³ /h)	80	-	-	-	4	10	16	22
- lift, transformator (1.000 kVA), pomp (< 10 kW)	85	-	-	3	9	15	21	27
- zuigerkoelmachine, LBK (\geq 50.000 m ³ /h)	90	-	2	8	14	20	26	32
- LBK (\geq 100.000 m ³ /h), pomp (\geq 10 kW)	95	1	7	13	19	25	31	37
- noodstroomaggregaat	100	6	12	18	24	30	36	42
Gebruik								
- lopen op linoleumvloer	80	-	-	-	4	10	16	22
- rennen, springen of stampen	100	6	12	18	24	30	36	42

Tabel 2 Indicatie van trillingniveaus, veroorzaakt door verschillende trillingbronnen. Voor de genoemde trillingcriteria is de vereiste trillingreductie genoemd.

Voor meer specifieke trillingbronnen worden metingen uitgevoerd in een vergelijkbare situatie. Zodra sprake is van een omgevingsgebonden trillingbron speelt de trillingoverdracht via de bodem een grote rol en wordt een overdrachtsmeting op locatie uitgevoerd. Bij bestaande trillingbronnen in de nabijheid van de opstelplaats van trillinggevoelige apparatuur kunnen de veroorzaakte trillingniveaus ter plaatse worden gemeten (zie figuur 5).



Figuur 5 Meting van de trillingniveaus bij het intrillen van damwanden (links) en bij de opstelling van een compressor (rechts).

De optredende trillingniveaus worden niet alleen bepaald door de trillingbron maar tevens door de onderliggende vloerconstructie. Als een trillingbron, bijvoorbeeld een compressor, wordt opgesteld op een lichte vloerconstructie met een grote overspanning zullen de trillingniveaus hoger zijn dan wanneer dezelfde trillingbron wordt opgesteld op een zware vloerconstructie met een kleine overspanning.

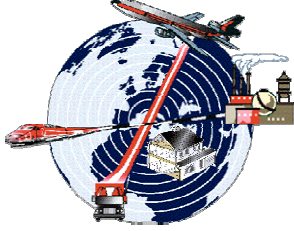
Voor loopbewegingen geldt analoog dat de veroorzaakte trillingniveaus op een lichte vloerconstructie hoger zijn dan op een zware vloerconstructie; vergelijk het lopen over een lichte, slappe touwbrug met het lopen over een zware en stijve betonnen brug. Hierbij dient tevens rekening gehouden te worden met opslinging bij de eigenfrequentie van de vloerconstructie.

Prognoses zijn behalve uit ervaringsgegevens of metingen ook te verkrijgen uit berekeningen. Voorbeelden zijn berekeningen op basis van massa-veer systemen of op basis van Eindige Elementen Modellen. In het volgende hoofdstuk worden enkele voorbeelden gegeven.

Op basis van de prognose van de verwachte trillingniveaus kan de trillingreductie worden bepaald die vereist is om te kunnen voldoen aan het eerder vastgestelde trillingcriterium. De vereiste trillingreductie kan per trillingbron verschillen (zie tabel 2).

5. Ontwerp van een gebouw in hoofdlijnen

Ter plaatse van de opstelplaats van trillinggevoelige apparatuur moeten de trillingniveaus die door de verschillende trillingbronnen worden veroorzaakt, voldoende laag zijn om aan de gestelde trillingcriteria te voldoen. Hierbij kan een minimaal vereiste trillingreductie worden bepaald, die gerealiseerd dient te worden binnen een combinatie van de volgende hoofdmaatregelen:

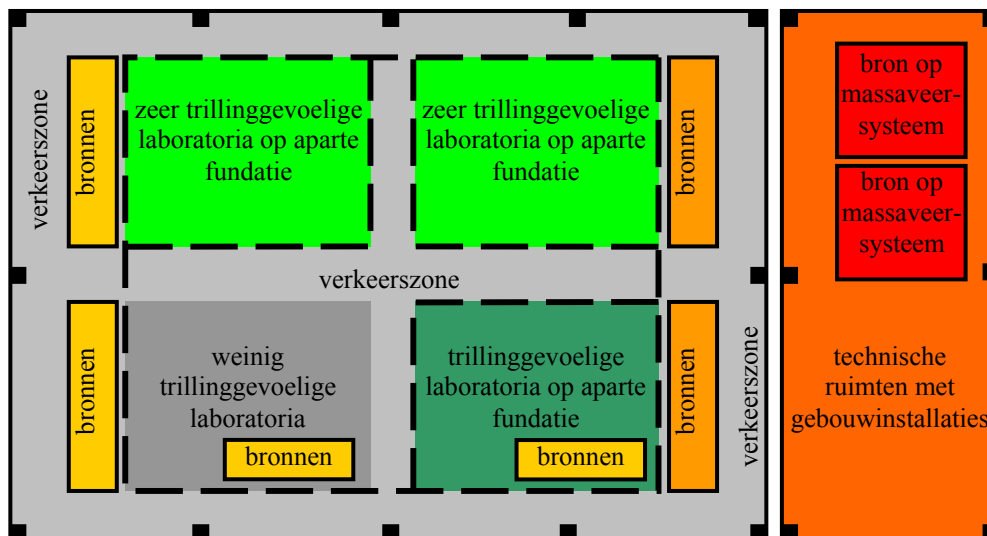


- reductie ter plaatse van de trillingbron, bijvoorbeeld door selectie van een bron met lagere trillingproductie of een trillingreducerende opstelling van de bron;
- reductie door vermindering van de trillingoverdracht, bijvoorbeeld door de onderlinge afstand te vergroten of een bijzondere constructie toe te passen;
- reductie ter plaatse van de trillinggevoelige apparatuur, bijvoorbeeld door een specifieke trillingreducerende opstelling.

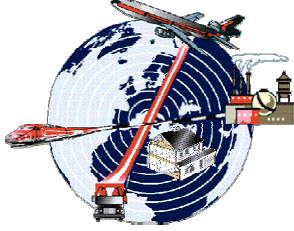
Door een combinatie van bovenstaande hoofdmaatregelen dient tussen trillingbron en trillinggevoelige apparatuur voldoende reductie te worden gerealiseerd.

Binnen een laboratoriumgebouw wordt een aanzienlijk aantal trillinggevoelige instrumenten opgesteld en is sprake van een groot aantal relevante trillingbronnen, zowel binnen het gebouw als daarbuiten. Als voor elke combinatie van trillingbron en trillinggevoelige apparatuur de vereiste reductie bepaald dient te worden, leidt dit tot een onwerkbaar aantal oplossingen en vereiste maatregelen.

Om tot een praktisch en flexibel gebouwontwerp te komen wordt trillinggevoelige apparatuur gegroepeerd op basis van de gestelde trillingcriteria. In het gebouwontwerp kan vervolgens een differentiatie worden aangebracht waarbij verschillende zones aangegeven worden waarbinnen wordt voldaan aan een zeker trillingcriterium. Door het groeperen van trillingbronnen en trillinggevoelige apparatuur binnen een gebouwontwerp ontstaat een indeling in verschillende zones, ofwel een vlekkenplan (zie figuur 6).



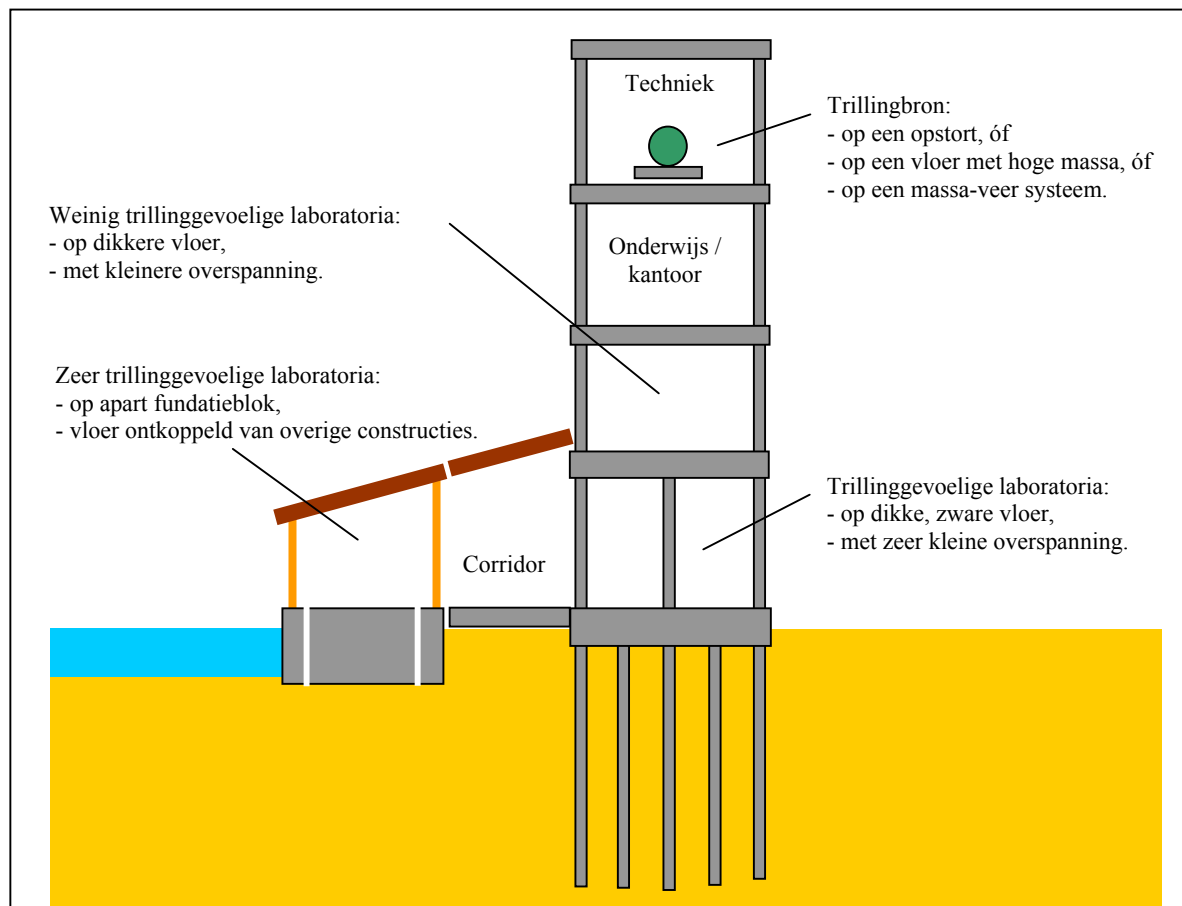
Figuur 6 Voorbeeld van een vlekkenplan van verschillende zones voor trillinggevoelige apparatuur en trillingbronnen.



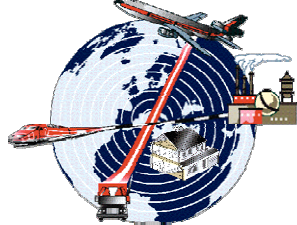
Voor de verschillende zones gelden restricties ten aanzien van de opstelling van trillingbronnen. De gebouwgebonden installaties zoals luchtbehandelingsinstallaties, pompen en liftinstallaties zijn niet geprojecteerd binnen de zone voor trillinggevoelige apparatuur. In zones voor normaal trillinggevoelige apparatuur kunnen opstellingsgebonden trillingbronnen zoals vacuümpompen worden opgesteld, terwijl in de zones voor zeer trillinggevoelige apparatuur lokale voorzieningen vereist zijn voor deze bronnen.

6. Bouwkundig ontwerp

Op basis van het vlekkenplan kan een bouwkundig ontwerp worden gemaakt, waarbij voor de verschillende zones een vloerconstructie c.q. fundatie en een voorzieningenniveau wordt ontworpen (zie figuur 7).



Figuur 7 Op basis van een vlekkenplan wordt een gebouwontwerp gemaakt, waarbij voor verschillende zones de vloerconstructie c.q. fundatie wordt ontworpen.



De principes van trillingreductie in vloerconstructies zijn vanwege het gevaar van opslingering, veelal niet gebaseerd op massa-veer systemen, maar op:

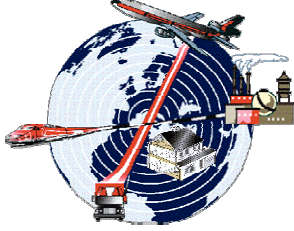
- verhoging van de massa van het fundatieblok of de vloer;
- verhoging van de stijfheid van de vloer, bijvoorbeeld door toepassing van relatief dikke vloeren of door relatief kleine overspanningen;
- ontkoppelen binnen het gebouw door toepassing van gebouwdilataties en aparte fundering;
- star koppelen van fundaties aan diepere bodemlagen met lagere trillingniveaus;
- ontkoppelen van fundaties van de bodem voor zeer lage trillingniveaus [lit. 3].

In tabel 3 is een globale omschrijving gegeven van de vereiste voorzieningen. Hierbij wordt opgemerkt dat dit geldt voor de gebruikelijke interne bronnen. Voor specifieke trillingbronnen zoals bijvoorbeeld koelmachines, noodstroomaggregaten en liftinstallaties kunnen aanvullende maatregelen nodig zijn. Ook voor de reductie van trillingen afkomstig van omgevingsbronnen kunnen aanvullende voorzieningen nodig zijn.

Trillingcriterium	Uitvoeringsprincipe vloerconstructie en bouwkundige voorzieningen
VC-A (94 dB)	vloer $\geq 500 \text{ kg/m}^2$
VC-B (88 dB)	vloer $\geq 500 \text{ kg/m}^2$, trillingbronnen trillinggeïsoleerd opstellen
VC-C (82 dB)	vloer $\geq 500 \text{ kg/m}^2$, technische ruimten op afstand of dilatatie, trillingbronnen trillinggeïsoleerd opstellen
VC-D (76 dB)	vloer $\geq 500 \text{ kg/m}^2$, dilatatie drukke verkeerszones, technische ruimten op afstand of dilatatie, trillingbronnen trillinggeïsoleerd opstellen
VC-E (70 dB)	vloer $\geq 700 \text{ kg/m}^2$, verkeerszones op afstand of dilatatie, technische ruimten dilatatie, trillingbronnen trillinggeïsoleerd opstellen

Tabel 3 Globale omschrijving van de vereiste bouwkundige voorzieningen, uitgaande van een normaal laboratoriumgebruik en een voldoende laag achtergrondtrillingniveau.

Indien omgevingstrillingen een voldoende laag niveau kennen is het zaak om geen ontoelaatbare opslingeringseffecten in het gebouw te krijgen. Loopbewegingen op de vloeren waarop de apparatuur is opgesteld, veroorzaken trillingen die veelal (mede)bepaald worden door de vloerconstructie zelf. Globaal kan worden gesteld dat bij een stijvere vloerconstructie (grotere vloerdikte, kleinere overspanning) de loopbewegingen een minder hoog trillingniveau veroorzaken.

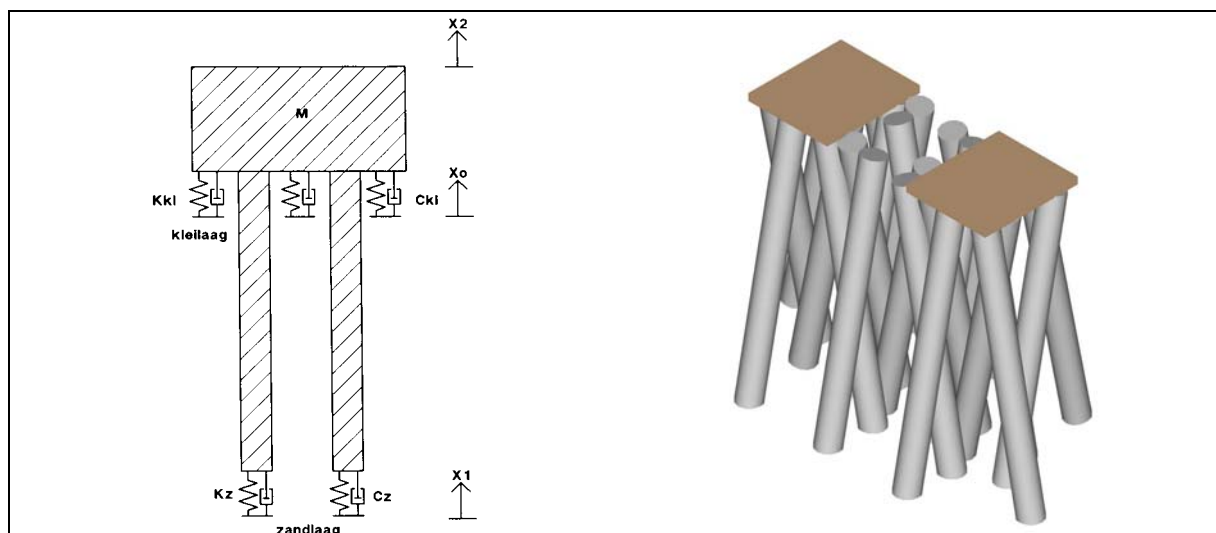


Voor specifieke bronnen kan het nodig zijn gedetailleerde berekeningen uit te voeren van de trillingoverdracht van bijvoorbeeld de bodem naar het gebouw [lit. 4] of van de trillingoverdracht door gebouwen. Deze berekeningen kunnen worden uitgevoerd:

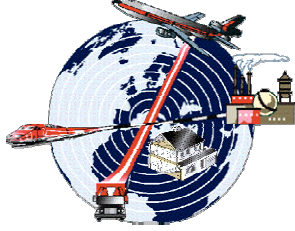
- met behulp van globale rekenmodellen gebaseerd op de gemiddelden van eerder verkregen meetresultaten;
- door schematisering van constructies als massa-veer-demper systemen, welke relatief eenvoudig numeriek kunnen worden doorgerekend [lit. 4,5];
- met een schematisering van de constructies als Eindige Elementen Model (EEM), waarbij door inversie van de stijfheidsmatrix de trillingsnelheden worden bepaald [lit. 6,7].

Bij het ontwerpen van een vloer dient de overdracht en aanstootgevoeligheid in meerdere richtingen te worden beschouwd. Een dikke, zware vloer kan in verticale zin een voldoende stijfheid bezitten, doch bij fundatie op rechte palen ontstaat in horizontale zin een slappe, makkelijk aan te stoten constructie. Door een vloer te funderen op geschoorde palen ontstaat een constructie die tevens in horizontale zin voldoende stijf is.

Op basis van een als meervoudig massa-veer-demper systeem geschematiseerde constructie (zie figuur 8) is een vloer ontworpen op palen die in diverse richtingen zijn geschoord. Met een dergelijke voorziening kan een reductie van oppervlaktetrillingen in de bodem gerealiseerd worden met een factor 2 à 3. Om de minimaal vereiste afstand tussen de palen te realiseren, is een driedimensionaal model opgesteld om het palenplan inzichtelijk te maken. Door de bouwtoleranties in het model in te voeren, zijn de kleinste afstanden tussen de palen berekend; deze mogen een zekere minimale afstand niet onderschrijden.



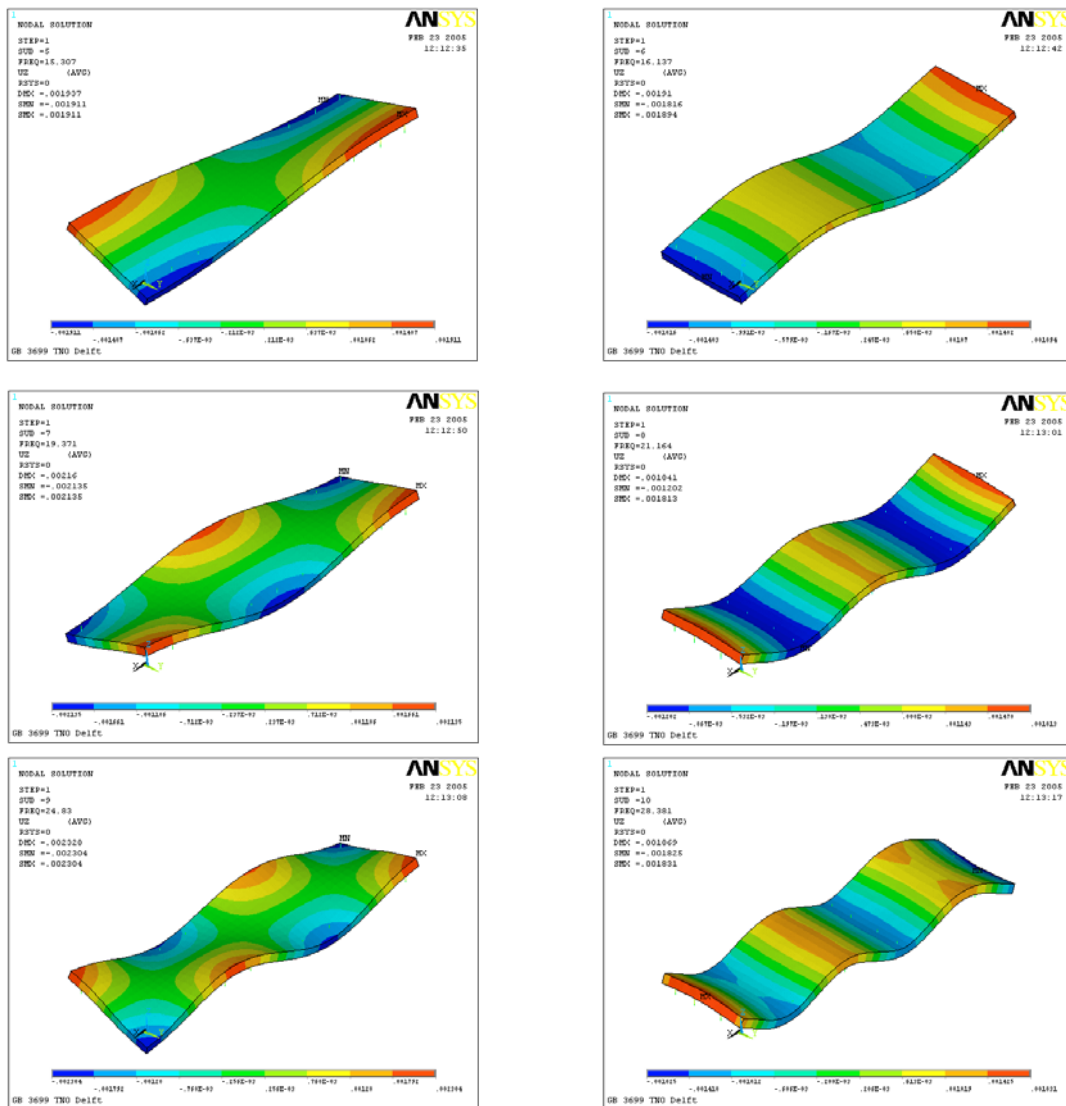
Figuur 8 Meervoudig massa-veer-demper systeem van de vloerconstructie op palen (links) en een driedimensionaal model van de geschoorde palen om de onderlinge afstand inzichtelijk te maken (rechts).



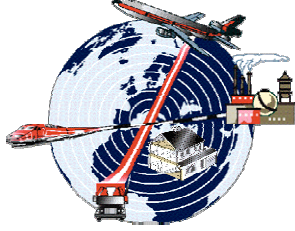
titel lezing
 Ontwerp van trillingreducerende constructies in gebouwen voor nanotechnologie en soortgelijke gevoelige laboratoria

bladzijde
 11/13

Deze vloer is uitgevoerd met een dikte van orde grootte 1 m, is apart gefundeerd en ontkoppeld van de rest van het gebouw. De vloer is vrijgehouden van de bodem, alleen via de palen ontstaat een koppeling met de bodem. Door toepassing van een zeer dikke vloer en fundatie op geschoorde palen, in diverse richtingen, is een voldoende stijfheid verkregen in zowel verticale alsook horizontale richting.

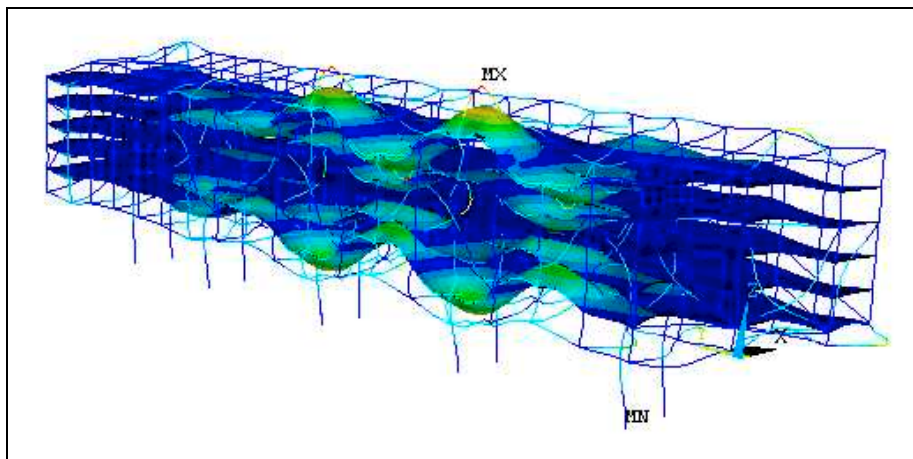


Figuur 9 Verschillende trillingmodi van de trillingarme vloerconstructie, berekend met een Eindige Elementen Model (EEM).



Voor een soortgelijke vloer op geschoorde palen is een Eindige Elementen Model (EEM) opgesteld van de vloer en zijn de verschillende trillingsmodi doorgerekend (zie figuur 9). Hiermee zijn zowel de trillingniveaus in de vloer bepaald veroorzaakt door verschillende trillingbronnen, zowel op de vloer (lopen, procesgebonden pompen) alsook in de omgeving (wegverkeer, trambaan).

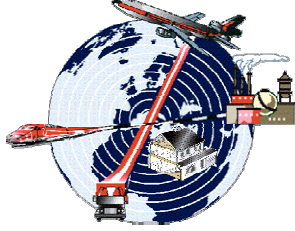
Om de trillingen van verschillende verdiepingvloeren in combinatie met de draagconstructie inzichtelijk te maken en de optredende niveaus te berekenen wordt een Eindig Elementen Model worden opgesteld voor het gehele gebouw (zie figuur 10).



Figuur 10 Voor de berekening van de trillingniveaus op verschillende verdiepingvloeren wordt van het gebouw een Eindige Elementen Model (EEM) opgesteld.

7. Conclusie

Om bij het realiseren van trillinggevoelige laboratoria te voldoen aan hoge eisen ten aanzien van optredende trillingniveaus dienen een aantal stappen genomen te worden. Er dient een zorgvuldige inventarisatie plaats te vinden van de relevante interne en externe trillingbronnen, de eisen van opgestelde trillinggevoelige apparatuur dienen gespecificeerd te worden en er dient een zorgvuldige prognose te worden opgesteld van het optredende trillingniveau. Door een efficiënte zonering en door het gebruik van geavanceerde rekentechnieken is het mogelijk gepaste voorzieningen te dimensioneren, die een economisch optimum zijn en waarbij voldaan wordt aan de gestelde trillingeisen.



8. Literatuur

- [1] “Generic Criteria for Vibration-Sensitive Equipment,” *Proceedings of International Society for Optical Engineering (SPIE)*, pp. 71-85, San Jose, CA, november 1991, C.G. Gordon.
- [2] Institute of Environmental Sciences IEST RP-12 “Considerations in Clean Room Design,” *IES-RP-CC012.2*, to be published in 2005.
- [3] “Reduction of low frequency vibration to very low levels: A test setup for a measuring device,” *Journal of Low Frequency Noise & Vibration*, vol. 6, nr. 2, 1987, W.M. Schuller, M.L.S. Vercammen;
- [4] “Berekeningsmodel voor overdracht van trillingen van de bodem naar gebouwen,” rapport RB683, CUR, 1993, M.L.S. Vercammen, M.P.M. Luykx.
- [5] “Vibration in Buildings,” *Internoise 1993*, Leuven, M.L.S. Vercammen.
- [6] “Structure borne sound from a lightrail in a fishnet stocking,” *Internoise 2005*, Rio de Janeiro, augustus 2005, M.L.S. Vercammen.
- [7] “Onderzoek naar trillingen in de bodem met behulp van Eindige Elementen Methode”, publicatie in *Geluid*, december 2003, J.F.W. Koopmans, F.C. van Eekhout.
- [8] “Trillingvrij bouwen op 15 m naast het spoor”, publicatie in *Bouwwereld*, mei 2004, J.F.W. Koopmans, F.C. van Eekhout.