Onderzoek naar trillingen ten gevolge van railverkeer

Het beperken van trillinghinder in nieuwbouw

Treinen die over het spoor rijden brengen het spoor en de daaronder liggende bodem in trilling. Deze trillingen planten zich voort naar de omgeving, en kunnen in gebouwen voelbare trillingen veroorzaken. De trillingniveaus in vloeren van gevoelige gebouwen, waaronder vooral woningen, dienen te voldoen aan objectieve streefwaarden, zodat de kans op trillinghinder voldoende klein is. Voor nieuw te ontwikkelen woningen is in dit artikel een onderzoeksmethode beschreven om aan die criteria te voldoen.

Door: Tim Hallegraeff

Over de auteur:
Tim Hallegraeff is adviseur bij Peutz, vestiging Zoetermeer.

Inleiding

Veel woningbouw is geprojecteerd nabij milieubelaste locaties. Om een goed woon- en leefklimaat te waarborgen, dient aandacht besteed te worden aan diverse milieuaspecten, zoals geluid, trillingen en externe veiligheid. Met een planlocatie in de nabijheid van het spoor (<100 m) dient, om eventuele trillinghinder zoveel mogelijk te voorkomen, de situatie met betrekking tot trillingen in kaart te worden gebracht conform de Handreiking Nieuwbouw en Spoortrillingen (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2019).

De volgende werkwijze kan daarbij gevolgd worden. In eerste aanleg worden op de planlocatie trillingmetingen uitgevoerd ter plaatse van de dichtst bijgelegen beoogde gevels. Als de optredende trillingen al op maaiveld kritisch zijn, is vervolgonderzoek noodzakelijk. Hiervoor kan een rekenmodel worden opgesteld dat op basis van de Eindige Elementen Methode berekent wat de te verwachten trillingniveaus zijn in de beoogde gebouwen en of er mogelijk constructieve maatregelen benodigd zijn om aan de geldende criteria te voldoen. Vervolgens worden zo nodig maatregelen gedimensioneerd om overschrijdingen van nagestreefde trillingwaarden te vermijden.
In dit artikel wordt deze systematiek mede aan de hand van een praktijkvoorbeeld nader toegelicht.

Streefwaarden

Er is in Nederland (nog) geen wet- en regelgeving[1] die verplicht stelt om aan bepaalde trillingwaarden in woningen te voldoen. Om trillinghinder in nieuwbouw tot een minimum te beperken wordt echter in veel omgevingsplannen opgenomen dat op de vloeren van woningen dient te worden voldaan aan streefwaarden (SBR Deel B, 2006). Dit is in overeenstemming met de eerder genoemde Handreiking.

1 Wel worden in het Besluit kwaliteit leefomgeving standaardwaarden aangegeven waarop in omgevingsplannen kan worden aangesloten (artikel 5.87 e.v.)

De streefwaarden hebben betrekking op voelbare trillingen tot 100 Hz. Boven de 100 Hz zijn trillingen in het algemeen niet meer door de mens voelbaar. Bij de bepaling van de beoordelingsgrootheden worden de trillingniveaus (gemeten trillingsnelheden) gewogen, waarbij rekening wordt gehouden met de trillinggevoeligheid voor verschillende frequenties door mensen. Door deze frequentieweging ontstaat een dimensieloze eenheid.
Voor woningen in nieuwe situaties waarbij sprake is van herhaald voorkomende trillingen gedurende lange tijd (waarvan bij trillingen veroorzaakt door spoorwegverkeer sprake is), worden de in tabel 1 gegeven streefwaarden gehanteerd.

Tabel 1 - Overzicht streefwaarden conform de richtlijn SBR-B voor de gebouwfunctie wonen in een nieuwe situatie bij herhaald voorkomende trillingen gedurende lange tijd

Periode	A1	A2	A3
Dagperiode (07.00 – 19.00 uur)	0,1	0,4	0,05
Avondperiode (19.00 – 23.00 uur)	0,1	0,4	0,05
Nachtperiode (23.00 – 07.00 uur)	0,1	0,2	0,05

De optredende trillingniveaus voldoen aan de streefwaarden indien voldaan wordt aan één van onderstaande voorwaarden:
- de waarde van de maximale trillingsterkte in een ruimte (V_{max}) is kleiner dan A_1;
- de waarde van de maximale trillingsterkte in een ruimte (V_{max}) is kleiner dan A_2 waarbij de kwadratisch gemiddelde trillingsterkte over de beoordelingsperiode in deze ruimte (V_{per}) kleiner is dan A_3. Trillingsterkten van 0,1 en lager worden bij de bepaling van V_{per} niet meegenomen.

Trillingen

Trillingen kunnen worden veroorzaakt door onder andere machines in de industrie, bouw- en sloopactiviteiten of infrastructuur (weg- en railverkeer). Er zijn verschillende soorten trillingen te onderscheiden:
- Continu voorkomende trillingen (bijvoorbeeld machines);
- Herhaald kortdurende trillingen (bijvoorbeeld door railverkeer);
- Incidenteel voorkomende, kortdurende trillingen (bijvoorbeeld door aardbevingen en explosies).

Railverkeer stoot tijdens het rijden via het spoor de onderliggende bodem aan, waardoor deze in beweging wordt gebracht. De hoogte van de trillingniveaus in de bodem op een bepaalde locatie zijn afhankelijk van de eigenschappen van de bron, zoals de massa, snelheid en eventuele oneffenheden in de wielen of het spoor, en van de overdrachtsweg zoals afstand tot het spoor en bodemopbouw.

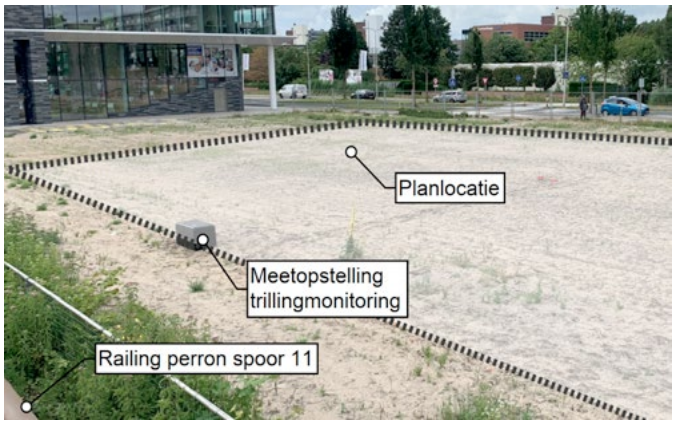
Trillingen zullen door geometrische uitbreiding en demping verzwakt de fundatie van een op afstand gelegen gebouw bereiken en het gebouw in trilling brengen. De mate van trillingen in het gebouw is van diverse factoren afhankelijk, zoals het al of niet onderheid zijn met fundatiepalen, massa en gebouwconstructie. De trillingen veroorzaakt door treinpasssages kennen per situatie een sterk verschillend frequentiespectrum. Als een trilling één of meerdere frequenties bevat die in overeenstemming zijn met één of meerdere eigenfrequenties van een (onderdeel van een) gebouwconstructie kan dit leiden tot resonantie. Resonantie kan sterk verhoogde trillingsamplitudes veroorzaken, zelfs als de externe wisselende kracht op zichzelf relatief klein is. Elke constructie kent meerdere eigenfrequenties. Veelal is de eerste eigenfrequentie maatgevend voor het optreden van resonantie. De volgende formule geeft de eerste eigenfrequentie f_n van een homogene vloerplaat:

$$f_n = \frac{\frac{\lambda^2}{a^2} \cdot \sqrt{\frac{E.I}{\mu.(1-v^2)}}}{2\pi}$$

De inklemmingsfactor (λ) wordt bepaald door de mate van inklemming (scharnierend, ingeklemd of een combinatie hiervan) van de vloeren. Dit bepaalt welke trilvormen (eigenfrequenties) er mogelijk zijn in het vloerveld. Daarnaast zijn de oppervlaktemassa (μ), de poissonratio (v), en de lengte van de plaat (a) in meters van belang.
De eigenfrequentie wordt daarnaast in belangrijke mate bepaald door de buigstijfheid van de vloer bepaald door het product van de elasticiteitsmodulus (E) en het traagheidsmoment (I).

Metingen

Op de planlocatie wordt op maaiveld meetapparatuur geplaatst. In figuur 1 is een dergelijke meetopstelling weergegeven voor een planlocatie aan de Burgemeester Jamessingel te Gouda.



Figuur 1: Meetopstelling planlocatie Gouda

De trillingmetingen worden uitgevoerd met behulp van een trillingrecorder, fabricaat SYSCOM, type MR3000C met geïntegreerde xyz-opnemer. De trillingopnemer is een triaxiale snelheidssensor en heeft een frequentiebereik van 1 tot 315 Hz.

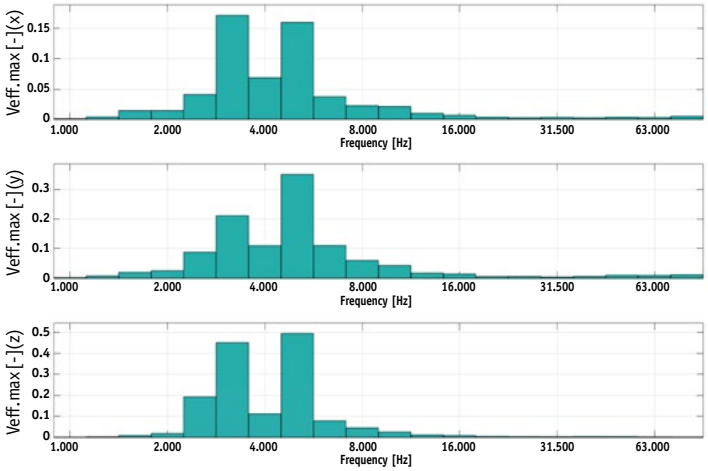
Uit de meetresultaten wordt de maximale effectieve trillingsnelheid per 30 seconden ($V_{eff,max,30,i}$) afgeleid. Hierbij wordt de gemeten trillingsnelheid frequentieafhankelijk gewogen volgens de weegfunctie die is opgenomen in voornoemde SBR-B. De dimensieloze effectieve waarde $V_{eff,max,i}$ is per passage bepaald voor de horizontale richtingen 'x' (parallel aan het spoor) en 'y' (loodrecht op het spoor) en de verticale richting 'z'.

De maximale trillingsterkte (V_{max}) is gelijk aan de hoogste waarde van $V_{eff,max,30,i}$ als er voor de trillingbron gedurende een representatieve periode gemeten is. In het geval van rail- en wegverkeer is dit bij voorkeur een meetperiode van een week als de maatgevende trillingbron tijdens één meetdag onvoldoende passeert. Naast de maximale trillingsnelheid (V_{max}) kan de trillingsterkte kwadratisch gemiddeld over de beoordelingsperioden (V_{per}) van belang zijn. Hierbij worden trillingen van 0,10 of lager niet meegenomen in de beoordeling conform voornoemde SBR.

Meetresultaten

De woningbouwontwikkeling aan de Burgemeester Jamessingel te Gouda is gelegen op minder dan 20 meter vanaf het spoor. Op het traject rijden goederentreinen, die doorgaans maatgevend zijn door hun relatief hoge massa en lage aanstootfrequenties in vergelijking tot passagierstreinen.

Om de haalbaarheid van woningbouw op de planlocatie te beoordelen zijn gedurende één week metingen verricht. Het maximaal optredende gewogen trillingniveau in de maatgevende z-richting bleek 0,6. Het frequentiespectrum behorende bij deze passage is weergegeven in figuur 2.

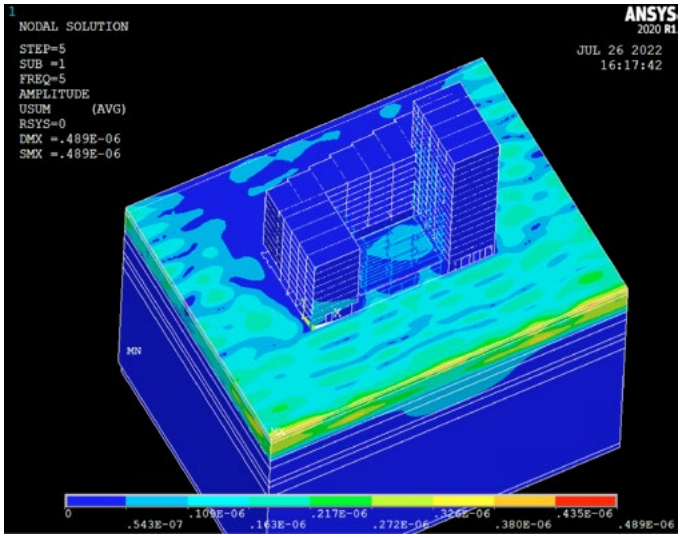


Figuur 2: Gemeten frequentiespectrum maatgevende treinpassage

Vervolgonderzoek

De mate waarin het optredende trillingniveau gereduceerd kan worden, hangt onder andere af van de aanstootfrequenties. Lage aanstootfrequenties worden doorgaans minder sterk gedempt. Voor de betreffende planlocatie is een vervolgonderzoek uitgevoerd. Alle treinpassages die de streefwaarden overschrijden worden in het vervolgonderzoek beoordeeld.

Het dempend vermogen van een constructie kan achteraf worden vastgesteld via metingen, wanneer het gerealiseerd is, maar dan zijn maatregelen niet meer te treffen, dit is niet praktisch.
Om de trillingniveaus in de gebouwen te kunnen voorspellen is daarom vooraf een 3D-rekenmodel opgesteld in ANSYS.
De trillingniveaus op de verschillende vloeren worden berekend gebruikmakend van de Eindige Elementen Methode (EEM); zie figuur 3. Doel is om met het model de maximale trillingniveaus in het gebouw ten gevolge van alle treinpassages te berekenen en te toetsen aan de streefwaarden.



Figuur 3: Rekenmodel ANSYS woningbouwontwikkeling te Gouda

In het rekenmodel worden bron (de treinpassages), overdracht (de bodem tussen bron en gebouw) en ontvanger (het gebouw) ingevoerd.

In het rekenmodel worden om de bronemissie in te voeren de verschillende bodemlagen op basis van sonderingsgegevens toegevoegd. De bodemlagen worden over het algemeen opgedeeld in verschillende typen zoals de lagen zand, klei of veen. Door analyse van de conusweerstand en het wrijvingsgetal worden de eigenschappen van de verschillende bodemlagen ingevoerd.
Daarna volgt een eerste rekenslag met uitsluitend de bodemlagen. Op de meetpositie(s) worden fitwaarden vastgesteld op basis van het verschil tussen gemeten en berekende waarde per tertsband.

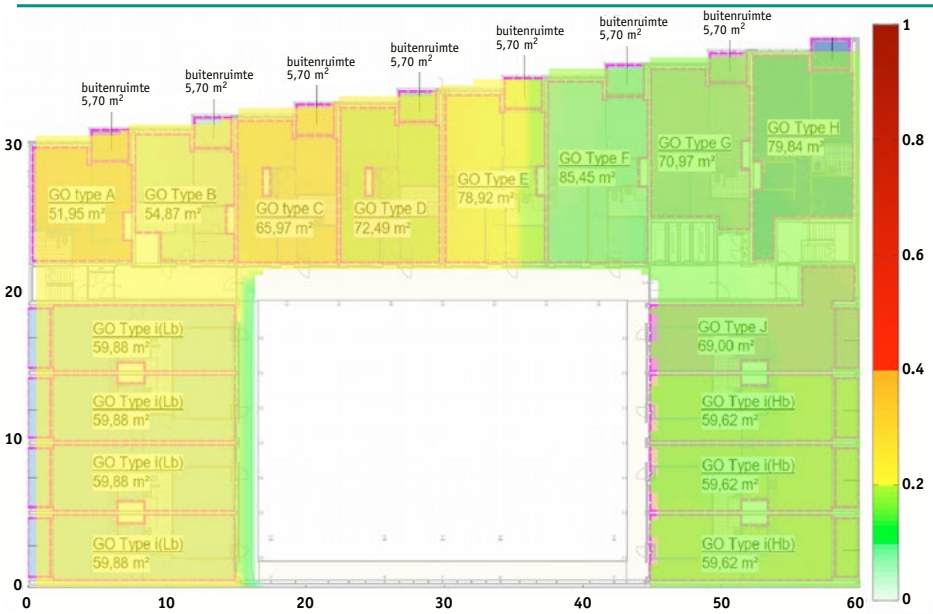
De constructieve plattegronden en de funderingsopzet worden aanvullend verwerkt in het rekenmodel. De constructieve elementen krijgen de materiaaleigenschappen zoals de dichtheid, poissonratio, dikte en elasticiteitsmodulus toegekend.

Beton is een van de meest gebruikte bouwmaterialen ter wereld en is ideaal voor dragende structuren in zowel woning- als utiliteitsbouw, voornamelijk vanwege de hoge druksterkte (NEN8005, 2022). Beton is een materiaal waar scheurvorming ontstaat als het op trek wordt belast. Dit resulteert in een lagere stijfheid. In het algemeen leidt dit tot een minder grote demping van optredende trillingen. Het biedt daarom grote voordelen om voorgespannen beton te gebruiken waarmee trekbelastingen van beton (vooral de vloerplaten) worden voorkomen.

Het toepassen van houtbouw komt hedendage steeds vaker voor. Het is een duurzamere, milieubewuste manier van bouwen. Een groot nadeel van een houten constructie is de relatief lage massa en stijfheid. Dit reduceert een optredende trilling minder dan beton.

Rekenresultaten

De trillingniveaus berekend in de constructie in ANSYS worden op basis van de eerdergenoemde fitwaarden per tertsband opgeschaald naar de te verwachten trillingniveaus. Een contourplaatje met de trillingniveaus op verschillende posities van de vloervelden wordt vervolgens gegenereerd. Een voorbeeld daarvan is weergegeven in figuur 4.



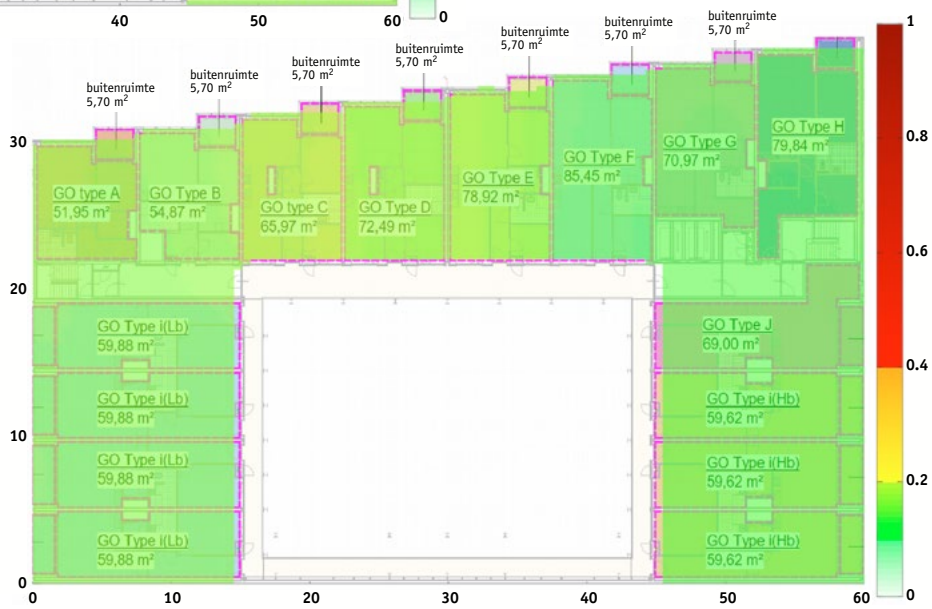
Figuur 4: Berekende trillingniveaus op de vloeren van een verdiepingsvloer van een woningbouwproject.

Een dergelijke figuur wordt voor alle pas
ges die mogelijk verhoogde trillingnivea
in de constructie veroorzaken gegeneree
Het is mogelijk dat in een constructie
meerdere aandachtspunten ten gevolge
diverse treinpassages aan het licht kome

Maatregelenonderzoek

Het komt regelmatig voor dat trillingniveaus in bepaalde tertsbanden in de beoogde gebouwen hoger zijn dan de streefwaarden aangeven.
Dit was zo ook het geval in de woningbouwontwikkeling in Gouda.

In overleg met de projectontwikkelaar en constructeur zijn mogelijke maatregelen vastgesteld. Hierin vindt altijd een afweging plaats tussen effectiviteit, kosten, haalbaarheid en of de maatregel wenselijk is vanuit bijvoorbeeld architectonisch oogpunt. Een passende, acceptabele en financieel haalbare maatregel is vervolgens toegevoegd aan het rekenmodel waarna een nieuwe rekenslag plaatsvindt. In dit project is op de 1e verdieping een voorgespannen breedplaatvloer in plaats van een niet-voorgespannen breedplaatvloer ingevoerd. Dergelijke vloeren worden minder snel op trek belast waardoor de scheurvorming minder significant is en er een stijvere vloerplaat wordt toegepast. Dit heeft tot resultaat gehad dat de trillingniveaus gereduceerd worden tot onder de streefwaarden voor nieuwe situaties (zie figuur 5). De geel aangeduide vloeren in figuur 4 (trillingniveaus tot 0,4) werden daardoor met een factor van circa 2 gereduceerd tot maximaal 0,2, weergegeven in groen.



Figuur 5: Berekende trillingniveaus in beoogde constructie na maatregelen

Conclusie

Woningbouw realiseren langs het spoor op relatief korte afstanden (<100 m) kan (flinke) uitdagingen met zich meebrengen met betrekking tot trillingen. Echter, met gedegen onderzoek en daaruit – zo nodig - af te leiden maatregelen is er veel mogelijk.

Het is aanbevelenswaardig de bestaande situatie op maaiveldniveau op qua bouwplannen relevante posities vroegtijdig in kaart te brengen middels trillingmetingen.

Als de situatie op een of meer positie(s) kritisch is, dient vervolgonderzoek eveneens in een vroeg stadium opgestart te worden. Prognoseberekeningen kunnen uitgevoerd worden met een Eindige Elementen Model die de dynamische aanstoting vanuit de bron (treinpassages), de overdacht (via de bodem) en de ontvanger (de specifieke vorm en constructie van het woningbouwcomplex) betrouwbaar beschrijft. Uit de resultaten daarvan kan in een vroeg stadium worden nagegaan of voldaan wordt aan de na te streven trillingniveaus. Bij niet voldoen kunnen (constructieve) maatregelen, veelal in samenspraak met ontwikkelaar en constructeur, worden doorgerekend op effectiviteit.