

Detailberekening Spoorzone Rijen

reflectie en geleiding van trillingen door de onderdoorgang



plaats & datum: Eindhoven, 2 september 2021

versie: definitief

opdrachtgever: Gemeente Gilze en Rijen

auteur(s): drs. Arnold Koopman, ir. Pieter de Jong

email: arnold.koopman@levelav.nl

telefoon: (+31) 040 247 27 00

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag openbaar gemaakt worden of aan derden beschikbaar gesteld worden zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Level Acoustics & Vibration. Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden van Level Acoustics & Vibration, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst. Het ter inzage tonen van het Level Acoustics & Vibration rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

Inhoud

1. Inleiding	3
2. Doel en uitgangspunten	4
3. Modelleerwijze	6
4. Resultaten	12
5. Vertaling naar de omgeving	14
6. Conclusies en aanbevelingen	20
Referenties	21

1. Inleiding

In het kader van het project Stationsomgeving Rijen wordt de huidige spoorwegovergang direct ten westen van het station Gilze-Rijen vervangen door een spooronderdoorgang. Dit kan consequenties hebben voor de trillingsbelasting op gebouwen in de omgeving.

Onderzoek in 2020 leidde tot de conclusie dat verwacht kon worden dat de komst van de onderdoorgang voor de meeste woningen in de omgeving tot een verlaging van spoortrillingen zal leiden (zie ref [1]). Tegelijkertijd was er voor een aantal adressen sprake van een te verwachte toename. Er was wel sprake van een significante onzekerheid over de mate van toename, met name vanwege onzekerheden over de fysische effecten van de onderdoorgang. Voor die effecten was een worst case benadering gehanteerd. Daarom werd geadviseerd de effecten nader te bestuderen en te kwantificeren met behulp van een gedetailleerd trillingsmodel van de onderdoorgang en de omringende bodem.

Dit rapport bevat het verslag van de detailmodellering van de onderdoorgang en de consequenties voor de trillingsprognose voor de omgeving.

2. Doel en uitgangspunten

Het onderzoek heeft als doelen:

- Bepalen van de effectiviteit van de spooronderdoorgang op de voortplanting van treintrillingen naar de omgeving, wat betreft de fysische fenomenen van
 - Reflectie: trillingen die zich door de bodem voortplanten kaatsen tegen de onderdoorgang waardoor een pand in de buurt van de onderdoorgang niet alleen trillingen direct van het spoor maar ook indirect na weerkaatsing ervaren.
 - Geleiding: trillingen die boven de spooronderdoorgang in het spoor ontstaan planten zich in de wanden van de onderdoorgang voort en stralen vervolgens af naar de bodem, waarin het zich verder voortplant naar panden in de omgeving.
- Bepalen van de toe- of afname van het trillingsniveau in de woningen in de omgeving vanwege de komst van de onderdoorgang door het updaten van het voorgaande onderzoek (ref [1]) met de resultaten van het effectonderzoek.

Uitgangspunten:

- De fenomenen wordt onderzocht in een “fysisch compleet” model. Gekozen is voor een model op basis van de “eindige elementen methode” (Engelstalige afkorting: FEM).
- De fenomenen worden geïsoleerd onderzocht. Dat betekent dat het model geen spoorbaan bevat en geen bebouwing. Slechts de bodem en de onderdoorgang worden, zo gedetailleerd als nodig voor de fenomenen, gemodelleerd.
- Het berekende effect van de fenomenen wordt ingebracht in een overkoepelend totaal model, waarin spoorbaan en bebouwing wel aanwezig zijn. Dit model is reeds, in 2020, opgesteld (ref [1]).

Naast de documenten die expliciet in dit rapport worden behandeld en terug te vinden zijn in de referentielijst achterin in dit rapport zijn de volgende documenten geraadpleegd.

- BF7177-RHD-ZZ-ZZ-M3-C-0000.ifc
- BF7177- DR-BB-1802 c1.0.pdf
- BF7177- DR-BB-1812 c1.0.pdf
- BF7177-RHD-ZZ-XX-NT-Z-0002 Hydrologie spoortunnel Rijen.pdf
- BF7177-RHD-ZZ-ZZ-M3-C-0000 – situatie.pdf
- BF7177-RHD-ZZ-ZZ-M3-C-0000.pdf
- BF7177-RHD-ZZ-ZZ-M3-C-0001 - Horizontale doorsnede.pdf
- BF7177-RHD-ZZ-ZZ-M3-C-0002 – Bovenaanzicht.pdf

- BF7177-RHD-ZZ-ZZ-M3-C-0003 - Doorsneden en aanzichten.pdf
- BF7177-RHD-ZZ-ZZ-M3-C-0004 – Demarcatie.pdf
- BF7177-RHD-ZZ-ZZ-M3-C-0005 – Langsprofiel.pdf
- 20520.1-ONT02-0 (ontwerp zuidzijde).pdf
- 221 Bouwplan noord aangepast 19 januari 2021.pdf

3. Modelleerwijze

Schematisering

Er wordt een FEM model gemaakt van bodem plus onderdoorgang. Dat betekent dat bodem en onderdoorgang in kleine stukjes (“eindige elementen”) worden geknipt. FEM modellen van bodemtrillingen hebben als nadeel dat ze vanwege hun omvang al snel uren tot maanden computertijd nodig hebben om doorgerekend te worden. Het is dus zaak keuzes te maken in de schematisering van de situatie die de rekentijd beperken tot uren of dagen.

Hoe hoger de frequenties zijn van de trillingen waaraan gerekend dient te worden, hoe korter de daarbij behorende golflengten en diensgevolge hoe kleiner de elementen. Er zijn namelijk tenminste 10 elementen per golflengte nodig voor een berekening. Aangezien de rekentijd van een FEM model haast exponentieel toeneemt met het aantal elementen is het van belang bij hogere frequenties het aantal elementen op een of andere manier begrensd te houden. Om die reden zijn er in dit geval aparte modellen gemaakt voor verschillende frequentiegebieden, namelijk voor 3 octaafbanden: 4 Hz, 8 Hz en 16 Hz. Het overkoepelend model, Ours, werkt met 6 banden (ook 2 Hz en 32 Hz en 63 Hz) maar het zijn 4, 8 en 16 die in Rijen dominant blijken (zie ref [1]). Bovendien blijkt uit een vergelijkbare studie, namelijk die voor de spooronderdoorgang in de N631 in Rijen (ref [2]), dat in een vergelijkbare situatie qua bodem en constructie met deze banden de effecten het best te bestuderen zijn. Enerzijds was daar een frequentie-afhankelijkheid van bijv. het reflectie-effect te zien, anderzijds bleek dat de 32 en 63 Hz banden lastig door te rekenen zijn (o.a. leidend tot zeer lange rekentijden).

De uitsplitsing naar frequentiegebieden maakt het mogelijk om per frequentiegebied, per octaafband dus, de omvang van het model te regelen. Bij hoge frequenties, waar de elementen klein dienen te zijn, is namelijk ook minder bodem nodig in het model om reflectie en afstraling te modelleren, waardoor het model kleiner kan worden en het aantal elementen minder sterk toeneemt. De gehanteerde regel voor de hoeveelheid bodem is een afstand van de rand van het model tot de onderdoorgang van 2 golflengtes.

Het FEM model wordt opgelost in het “tijddomein”. Dat betekent dat er wordt uitgerekend hoe golven zich voortplanten in de loop van de tijd.

De berekening in het tijddomein vindt plaats via een “expliciete” methode, wat betekent dat zeer kleine tijdsstappen (orde microseconden) worden gebruikt om stap voor stap de golfvoortplanting te simuleren. Het alternatief, een “impliciete” methode, vraagt bij een zo’n groot model als dit teveel computergeheugen.

Het model is voorzien van absorberende randelementen om te voorkomen dat golven reflecteren aan de randen van het model waar ze in werkelijkheid zich verder door de bodem naar de omgeving voortplanten.

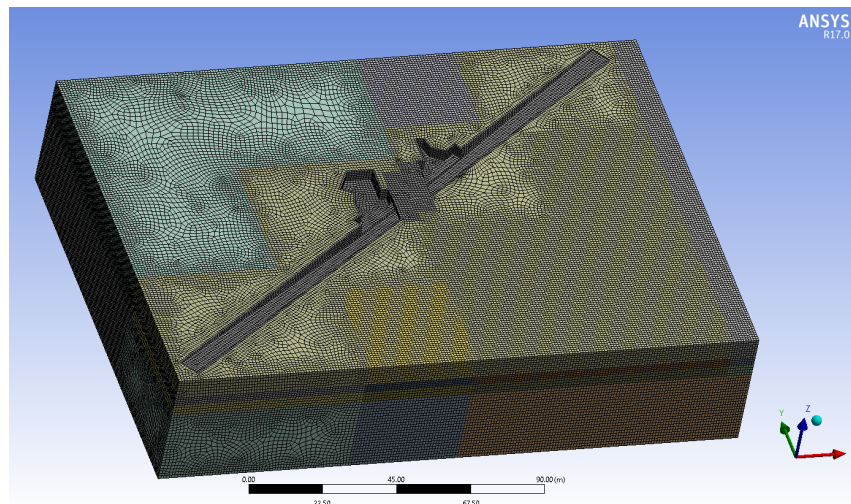
Om het model verder te verkleinen wordt in het algemeen indien mogelijk gebruik gemaakt van symmetrie: dan wordt slechts één kant van het spoor of één kant van de onderdoorgang gemodelleerd. In dit geval was het niet mogelijk symmetrie toe te passen: de detaillering van de trappartijen naar het station verhinderde dat. Om het model verder te optimaliseren in aantal elementen en rekentijd zijn er namelijk twee soorten modellen gemaakt: een model ter bestudering van reflecties en een model ter bestudering van geleiding. Voor de reflecties dient namelijk een trillingsbron op enige afstand van de onderdoorgang te worden gesimuleerd terwijl voor de geleiding de bron ter plekke van het viaduct over de onderdoorgang dient te geplaatst.

Voor het uitvoeren van de berekening wordt de commerciële code *LS-Dyna* gebruikt.

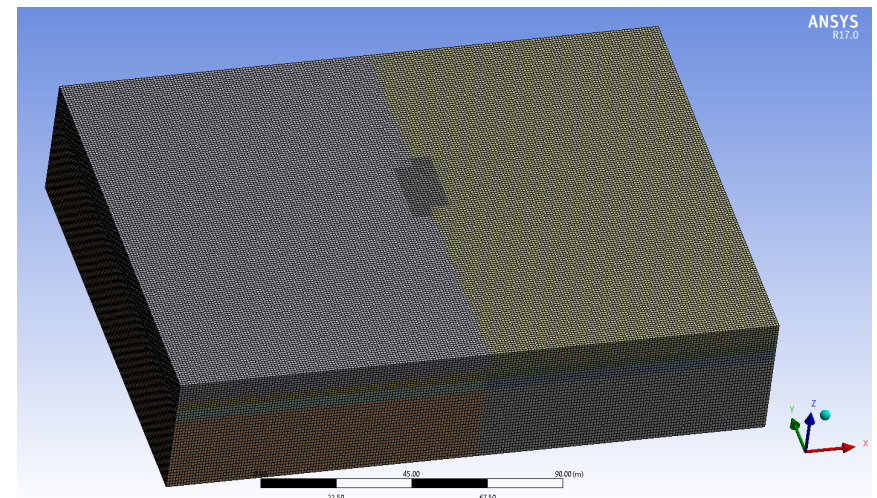
Voor de reflectie/diffractie sommen en geleidingssommen zijn de octaafbanden zoals gegeven in Tabel 1 bestudeerd, zowel met als zonder tunnel. Per octaafband zijn 4 modellen gebouwd (reflectie resp. geleiding, met en zonder onderdoorgang).

Tabel 1: onderzochte frequentiebanden met hun frequentieranges

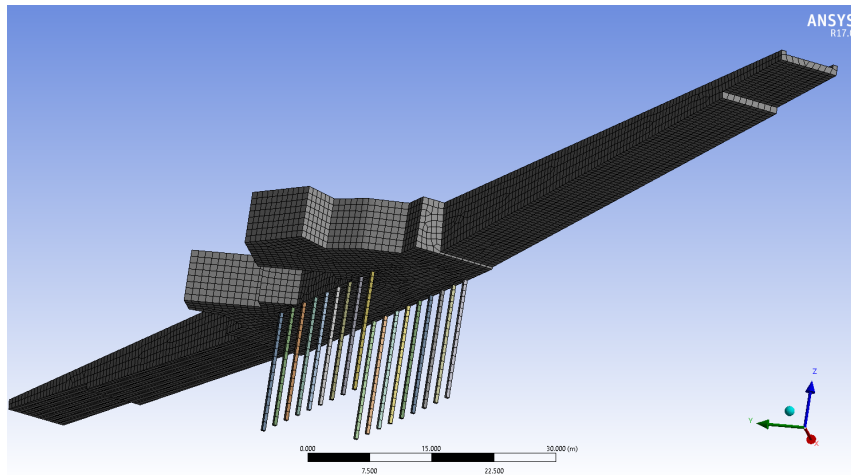
Center frequentie [Hz]	Minimum frequentie [Hz]	Maximum frequentie [Hz]
4	2.8	5.7
8	5.7	11.3
16	11.3	22.6



Figuur 1: FEM model van onderdoorgang plus spoorviaduct, met de omliggende bodem; mesh en omvang voor 16 Hz octaafband analyse



Figuur 2: Referentie FEM model zonder onderdoorgang en spoorviaduct, alleen de omliggende bodem; mesh en omvang voor 16 Hz octaafband analyse



Figuur 3: funderingspalen onder het centrale gedeelte van de onderdoorgang

Elk model is qua elementgrootte en modelomvang afgestemd op een octaafband en bij de naverwerking van de resultaten worden de modeluitkomsten (verplaatsingen van de bodem) eerst gefilterd naar die octaafband.

Beschrijving model

Model afmetingen

De afmetingen van het model in het horizontale vlak worden bepaald door:

1. de afmetingen van de onderdoorgang
2. de afstand van de bronpositie (voor de reflectie som) tot de onderdoorgang
3. de afstand van de ontvangposities ("responsiepunten" c.q. "evaluatiepunten") tot de onderdoorgang
4. het frequentiegebied waarvoor het model is bedoeld

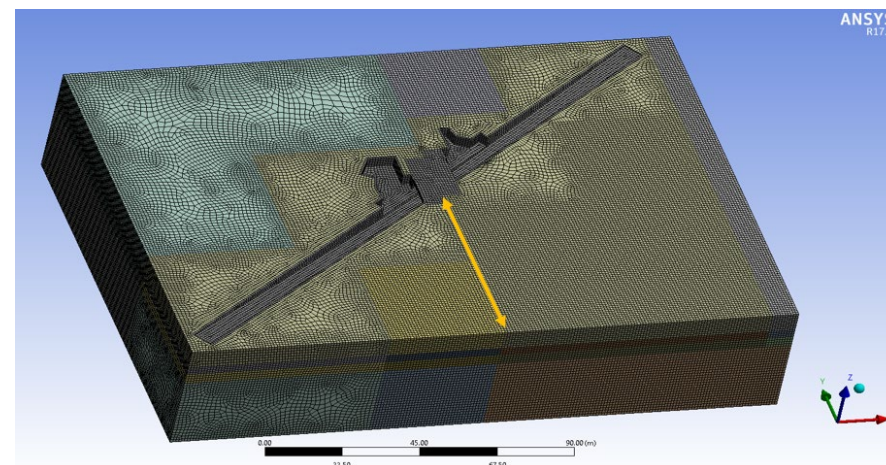
De bronpositie voor de reflectie som ligt op de rand van het model. De gemodelleerde afstand tot de tunnel is afhankelijk van de laagste frequentie in het frequentiegebied waarvoor het model van toepassing is. Er dienen tenminste 2 golven in de gemodelleerde afstand te passen om zeker te stellen dat zich een op de onderdoorgang invallende golf ontwikkelt die van het type "Rayleigh" is, zoals dat ook in de praktijk gebeurt. De benodigde afstand is bepaald voor alle 11 gemodelleerde bodemlagen. Van de 11 lagen is de grootste afstand gekozen als maatgevende waarde.

Tabel 2: breedte van het model, afhankelijk van de octaafband

Center frequentie [Hz]	Afstand tot tunnel [m] (y-richting – oranje pijl)
4	177
8	89
16	67
	Bepaald door onderdoorgang

De breedte van de modellen worden bepaald door het feit dat een reflectie van minimaal 45 graden bestudeerd wordt. Hierdoor is de breedte van de modellen gelijk aan 4 keer de afstand tot de tunnel.

De diepte van de modellen wordt bepaald door de bodemdata en de diepte van de constructie. De palen steken tot 23 meter diep en steunen op een zandlaag die tot relatief grote diepte gaat. De bodemdata is gegeven tot 40 meter diep. Gekozen is het model 40 meter dik te maken: dit is ruim voldoende om de Rayleigh golven en andere golftypen die zich op maaiveld manifesteren zich te kunnen laten ontwikkelen alsmede de dynamische paal-bodem interactie te laten plaatsvinden.



Figuur 4: de gele pijl illustreert de afstand tot de tunnel; dit specifieke model betreft het 16 Hz model, welke het meest krap de onderdoorgang omsluit

Bodemopbouw

De bodemopbouw is bepaald door de bodemmodule van Ours.

De bodem is opgebouwd uit 4 bodemlagen. De definitie van deze bodemlagen en materiaaleigenschappen zijn gebaseerd op de verschillende sonderingen in de omgeving van de onderdoorgang die beschikbaar zijn de Basisregistratie Ondergrond (BR). De resultaten van verschillende metingen zijn door Ours gecombineerd. Zie tabel 3.

Constructie

De constructie, bestaande uit een betonnen bak en een viaduct er overheen, is in detail gemodelleerd, inclusief de trappartij aan de oostkant en de palen onder de bak. In een later stadium (na voltooiing van de berekeningen) is een verlenging van de bak in beeld gekomen als een uitvoervariant. Deze verlenging is niet gemodelleerd en doorgerekend. De resultaten van de oorspronkelijk bak zijn voldoende representatief voor wat betreft het effect van reflectie en geleiding. Het effect van de geometrische verlenging wordt aan de hand van het overkoepelende model Ours verrekend.

Materiaalgegevens

De invoergegevens van een FEM model betreffen, naast de afmetingen, ook de gegevens die een rol spelen in het dynamisch gedrag van het materiaal: elasticiteit (ook Young's modulus genoemd), dichtheid, Poisson's ratio en dempingsratio. Voor de vertaling van bodemsonderingen naar bodemmateriaalgegevens is gebruik gemaakt van de zogenaamde "cpttool" module van Ours. Tabel 3 bevat de gebruikte waarden.

Mesh

De mesh is gegenereerd met de commerciële applicatie ANSYS Workbench.

In x-richting hebben alle lagen hetzelfde aantal elementen op de lijnstukken (edge sizing). De afmeting van de elementen in x-richting zijn bepaald door het bepalen van de grootte van het element die nodig is voor de beschrijving van de hoogste frequentie met 10 elementen. Deze analyse is voor elk bodemtype uitgevoerd. De kleinste waarde uit deze analyse met alle bodemtypes bepaalt het benodigde aantal element in x-richting voor alle bodemlagen.

Voor de y-richting geldt hetzelfde als de x-richting. Voor de z-richting is de uitkomst van de analyse voor de maximale elementgrootte benodigd voor het beschrijven van de hoogste frequentie met 10 elementen gebruikt voor elke bodemlaag afzonderlijk.

Randvoorwaarden

De gebruikte randvoorwaarden zijn als volgt.

- Vlak -x: oneindigheidsrandvoorwaarde
- Vlak +x: oneindigheidsrandvoorwaarde
- Vlak -y: oneindigheidsrandvoorwaarde
- Vlak +y: oneindigheidsrandvoorwaarde
- Vlak -z: vast

Tabel 3: invoergegevens van de materialen van de bodem en van de onderdoorgang

	Diepte		Elasticiteit	Dichtheid	Poisson's Ratio	Damping
	van [m]	tot [m]	[MPa]	[kg/m ³]	[-]	[%]
Bodem	0,0	7	180	1850	0,30	1,2
	7	10	225	1870	0,49	1,0
	10	14	280	1900	0,49	1,0
	14	40	340	1940	0,49	0,9
Onderdoorgang	-	-	30000	2300	0,18	0.02

Aanstootposities

Een krachtaanstoting is voor beide modeltypes (reflectie en geleiding) gebruikt. De kracht heeft de vorm van een halve sinus met de impuls tijd gelijk aan $1/(\text{center frequentie} * 2)$. Voor de modellen zonder onderdoorgang is de kracht op exact dezelfde positie ingeleid op de bodem als bij de bijbehorende modellen met onderdoorgang. De kracht binnen het reflectie/diffractie model is verticaal en exponentieel afnemend over de diepte van het model. De kracht in het geleidingsmodel is een puntkracht op de westelijke wand, daar waar het spoorviaduct op de wand rust, onder een hoek van 45 graden met de normaal van die wand en met de normaal van het maaiveld.

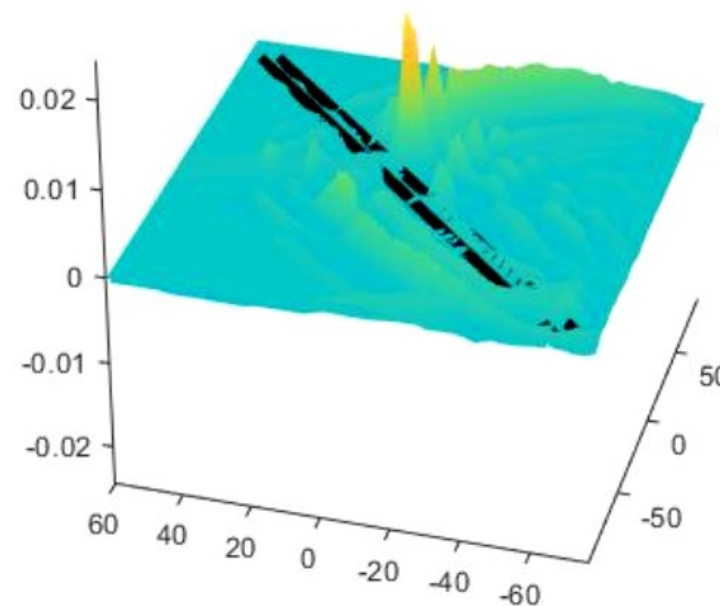
4. Resultaten

De output van een FEM berekening die wordt opgeslagen voor naverwerking zijn de verplaatsing (de verstoring) van het maaiveld als functie van de tijd vanwege de “klap” op het model (excitatie). Figuur 5 toont een voorbeeld van een momentopname.

De naverwerking gaat als volgt.

Reflectiemodel: voor elk van de twee delen van het maaiveld (voor en achter de onderdoorgang t.o.v. de aanstoting) wordt het totale vermogen in het maaiveld berekend, voor elke tijdsstap. Dit gebeurt door middel van integratie van het vermogen over het modeloppervlak. Deze berekening vindt plaats voor zowel het model met als het model zonder de onderdoorgang. Hieruit wordt vervolgens de verhouding bepaald van het vermogen aan de zendkant (maaiveld voor de onderdoorgang) ten opzichte van het vermogen van zendkant en ontvangkant (maaiveld achter de onderdoorgang) samen. Op het moment dat golven de onderdoorgang bereiken kunnen er twee dingen gebeuren: de golven weerkaatsen en blijven aan de zendkant (reflectie), of de golven spoelen onder de onderdoorgang door (diffractie). In zijn algemeenheid treden beiden in zekere mate op. Bij pure reflectie zal de berekende vermogensverhouding (zend/totaal) 1 blijven, bij diffractie zal de vermogensverhouding naar 0 gaan (alle energie naar de ontvangkant).

Geleidingsmodel: de energie in het maaiveld wordt berekend voor elke locatie op het maaiveld door integratie van het vermogen over de tijd. Dit wordt bepaald voor het model met en het model zonder de onderdoorgang. De verhouding geeft het effect van de wand van de onderdoorgang voor die locatie. Indien er geleiding optreedt zal dit zich uiten in zones verder van de aanstoting waar de verhouding met/zonder onderdoorgang groter is dan 1: de onderdoorgang brengt energie verder het veld in. Naast voortplanting door de wand spelen daarbij nog twee effecten: de mate waarin vermogen wordt opgewekt met en zonder de wand door de krachten van de passerende trein alsmede de effectiviteit waarmee trillingen in de wand worden afgestraald naar de omringende bodem. Al deze effecten worden verrekend in dit model. In tabel 4 worden de resultaten gepresenteerd. Het betreft de hoeveelheid energie die door het effect (resp. reflectie en geleiding) in de omgeving terecht komt in verhouding tot de energie die door directe voortplanting (dus zonder tussenkomst van de onderdoorgang) al in de bodem aanwezig is. Een waarde van bijv. 35% betekent dat de tunnelbak zorgt voor een versterking met een factor 1,35. Bij het in rekening brengen daarvan dienen nog de



Figuur 5: verticale verplaatsing van het maaiveld, 0,57 seconde na excitatie; dit is het reflectiemodel bij 16 Hz, de tunnelbak is in de naverwerking achterwege gelaten, de globale ligging ervan is aangegeven met de twee zwarte lijnen

geometrische aspecten van de voortplanting in rekening te worden gebracht. Bij reflectie wordt daarvoor de spiegelbron methode gebruikt, waarbij de percentages uit tabel 4 de sterkte van de spiegelbron bepalen. Bij geleiding gelden vergelijkbare geometrische regels.

In tabel 4 zijn twee afhankelijkheden buiten beschouwing gelaten:

- De effectiviteit van reflectie kan ook afhangen van de hoek van inval van de bodemgolf. De gepresenteerde resultaten zijn in feite een gemiddelde over alle hoeken. Scherpe hoek van inval (scherende inval) is overigens met minder gewicht in dat gemiddelde terecht gekomen vanwege de beperkte lengte van het model. Analyse van de reflectie-energie als functie van de tijd, en daarmee als functie van de hoek van inval gezien de geometrie van de schematisatie, tonen overigens geen grote afhankelijkheid. Wel is te zien dat, zoals fysisch verwacht kan worden, een scherpere hoek leidt tot meer reflectie.
- De effectiviteit van geleiding kan ook afhangen van de afstand tot het spoor en meer in het algemeen afhangen van de locatie op het maaiveld. Omdat geleiding als effect geen rol blijkt te spelen valt er over deze afhankelijkheid niet te rapporteren.

Tabel 4: grootte van de twee effecten, per frequentieband, uitgedrukt in percentage van de energie die extra in de omgeving terecht komt; cursief (de 32 en 63 Hz banden) zijn geschat

	2 Hz	4 Hz	8 Hz	16 Hz	32 Hz	63 Hz
Reflectie	<i>0%</i>	0%	30%	65%	<i>80%</i>	<i>90%</i>
Geleiding	<i>0%</i>	0%	0%	0%	<i>0%</i>	<i>0%</i>

Voor de 2 Hz, 32 Hz en 63 Hz octaafbanden is het ook wenselijk effectwaardes te hebben: het overkoepelende model Ours vereist ook voor deze banden input. Gezien het geringe belang van deze banden in Rijen zullen de effectwaardes voor die banden weinig impact hebben op de uiteindelijke prognose. Daarom zijn deze banden niet doorgerekend en daarom is het voldoende om voor de invoer van Ours waardes te schatten. Op basis van fysica is te verwachten dat de reflectie naar lagere frequenties (2 Hz) 0% blijft en naar hogere frequenties (32 en 63 Hz) toeneemt richting 100%. De effectstudie voor de N631 (ref [2]), waarin wel t/m 63 Hz is gerekend, ondersteunt dat. Die studie had ook als uitkomst dat geleiding ook bij 32 en 63 Hz (nog) niet optreedt.

Over de resultaten valt nog het volgende op te merken.

- Aangaande reflectie was verwacht dat bij lage frequenties er geen reflecties zouden optreden (golven spoelen onder de bak door) en bij hoge frequenties juist wel. De vraag was bij welke frequentie het kantelpunt zou liggen. Deze vraag is nu beantwoord.
- De geleiding blijkt niet effectief. Analyse van de energiepropagatie laat zien dat energie zich weliswaar snel en vrij ongedempt door de wand verplaatst maar enerzijds wordt er minder energie opgewekt en anderzijds wordt de energie niet afgestraald.

5. Vertaling naar de omgeving

De effectresultaten van de detailmodellering zijn ingevoerd in het reeds bestaande trillingsmodel Ours waarmee per adres een prognose wordt gedaan. Zie ref [1] voor de beschrijving daarvan, waaronder de uitgangspunten wat betreft treinverkeer en bebouwing.

De resultaten worden in figuren 6 en 7 gepresenteerd. De eerste betreft trillingsgrootheid V_{max} (het hoogste niveau dat per week is te verwachten).

De tweede betreft V_{per} , een tijdgemiddeld niveau voor de dag-, avond- en nachtperiode.

De resultaten betreffen een “verwachtingswaarde” met een bandbreedte. De kans is 95% dat de daadwerkelijke waarde binnen die bandbreedte valt.

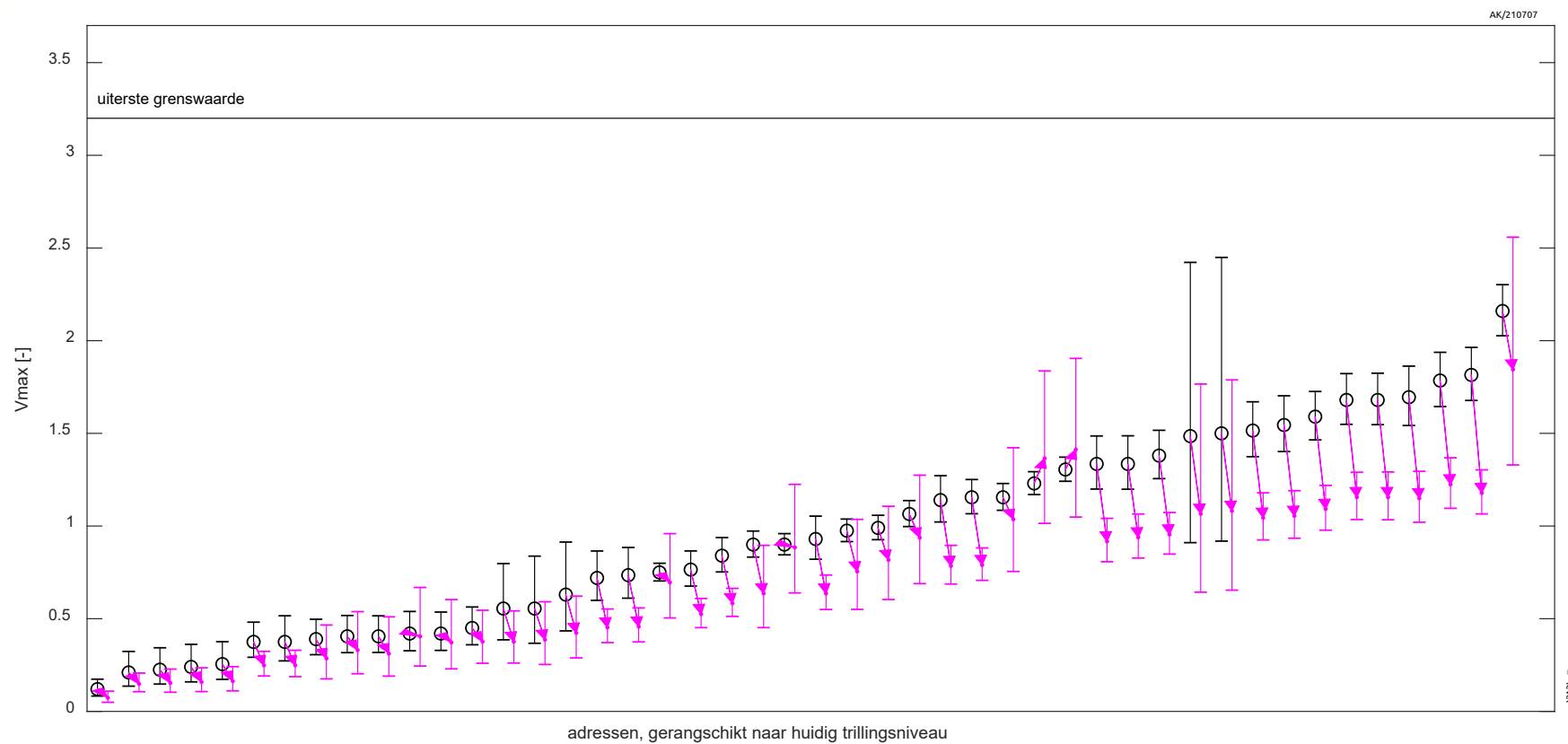
Op alle adressen neemt V_{per} af. Op twee adressen, namelijk Stationsstraat 3 en 3a, neemt V_{max} naar verwachting toe. De verwachte toename daar is ruim onder de 30% en daarom niet merkbaar. Gezien de onzekerheden in alle onderdelen van de modellering is er echter een kans dat er op die twee adressen toch sprake zal zijn van een toename van meer dan 30%, waarmee het merkbaar zou worden. Op geen van de andere adressen is daar een gerede kans op.

Volgens het toetsingskader (zie ref [1] en ref [3]) dienen maatregelen te worden overwogen indien op een of meer adressen tenminste een van de volgende twee situaties geldt:

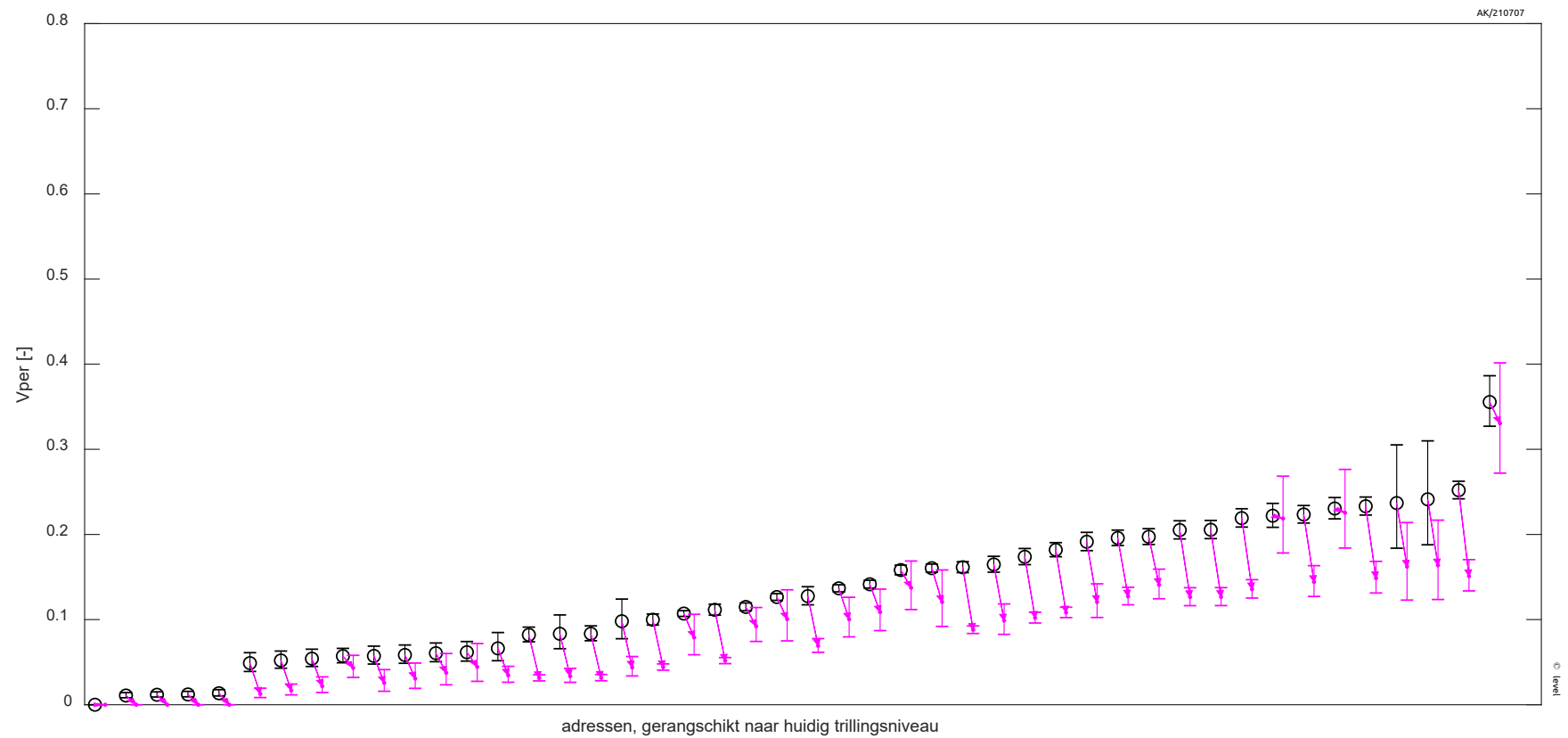
- $V_{per} > 0,1$ en verder toeneemt vanwege het project
- $V_{max} > 0,2$ en toeneemt met meer dan 30% vanwege het project

Naar verwachting wordt dus voldaan aan de Bts.

De resultaten tot stand zijn gekomen met behulp van de best beschikbare prognosemethoden maar er resteert altijd een modelonzekerheid. Daardoor blijft er een kans dat achteraf blijkt dat op de twee eerder genoemde adressen toch sprake is van een toename van meer dan 30% en dus niet wordt voldaan aan de Bts. In dat geval stelt de Bts (ref [3]) dat alsnog maatregelen dienen te worden overwogen. Dat “overwegen” houdt in dat maatregelen worden ontworpen en indien doelmatig bevonden (gunstige kosten/baten verhouding) te worden uitgevoerd. In de praktijk zijn het vooral constructieve aanpassingen aan woningen, zoals verstijven van vloeren, die vaak (niet altijd) doelmatig blijken.



Figuur 6: prognose van V_{max} nu (zwart) en in de toekomst (roze), met bandbreedte in verband met de onzekerheid van de prognose; twee panden hebben een relatief grote onzekerheidsmarge, de oorzaak daarvan is onzekerheid over de bijdrage van aanbouw aan de constructieve stijfheid van het pand



Figuur 7: prognose van Vper nu (zwart) en in de toekomst (roze), met bandbreedte in verband met de onzekerheid van de prognose

Effect van een verlenging van de zuidelijke kant van de onderdoorgang

Voor verreweg de meeste woningen in het gebied geldt dat per saldo de trillingsniveaus omlaag gaan. Het wegnemen van de trillingen van de spoorwegovergang is van veel meer invloed dan de komst van extra trillingen vanwege reflecties.

Een ander effect, namelijk het geleiden en afstralen van trillingen door de wanden dieper de omgeving in blijkt volgens de berekeningen niet op te treden. Er is sprake van geleiding maar niet van afstraling.

Een langere onderdoorgang heeft dus alleen consequenties in verband met de invloed van wandreflectie.

Aan de zuidzijde heeft de onderdoorgang voor woningen ten westen van de Julianastraat een afschermende, dus gunstig effect. Een langere onderdoorgang betekent dat meer panden (namelijk nu ook woningen ten zuiden van de Karel Doormanstraat) in de gunstige schaduw van de onderdoorgang komen te liggen. Woningen ten oosten van de Julianastraat krijgen extra reflecties. Tot nu toe trof dat alleen de Julianastraat 118, 110 en 106. Deze woningen hebben ook voordeel van het wegnemen van de spoorwegovergang en gaan er per saldo op vooruit. Bij een langere onderdoorgang komen ook huisnummers 102, 100, 98A en verder in beeld. De bijdrage van trillingen van de spoorwegovergang wordt op grotere afstand relatief geringer ten opzichte van die van het doorgaande spoor en het positieve effect van het wegnemen van de overgang navenant kleiner. Verder blijkt uit de analyse dat de constructie van een woning invloed heeft op de mate waarin deze gevoelig is voor de wandreflecties. Die reflecties treden namelijk alleen op voor hogere trillingsfrequenties terwijl sommige panden juist gevoelig zijn voor lagere frequenties en de onderdoorgang daarom niet zullen "opmerken". Extrapolatie van de huisnummers 118, 110 en 106 naar nummers verder naar het zuiden is dus niet triviaal.

Huisnummer 106 kan als "gidspand" voor de zuidelijker woningen worden gehanteerd. Vanuit trillingsoptiek is de constructie van 106 vergelijkbaar met de zuidelijker woningen. Voor dit pand is berekend dat het trillingsniveau zal afnemen met 30% en dat het zal voldoen aan de grenswaarde van de Bts voor bestaande situaties. Zuidelijker panden zullen een kleinere afname ervaren (vanwege de geringere invloed van het wegnemen van de spoorwegovergang) maar een toename is niet waarschijnlijk. Daar komt bij het trillingsniveau in die panden niet hoger zal zijn dan in 106 (uitgaande van een vergelijkbare bouwconstructie) en zelfs lager vanwege de grotere afstand tot het spoor en dus in de toekomstige situatie volgens de berekeningen zullen voldoen aan de grenswaarde van de Bts.

Concluderend kan worden gesteld dat het voornaamste negatieve effect van een verlenging van de onderdoorgang is dat enige panden aan de even kant van de Julianastraat, ten zuiden van de Karel Doormanstraat, een wat geringere afname van het trillingsniveau zullen ervaren. De komst van de onderdoorgang blijft voor deze woningen sowieso gunstig en hun trillingsniveaus zullen naar verwachting komen te voldoen aan de grenswaarde van de Bts.

Nieuwbouw Spoorzone

Ten zuiden van het spoor zal huidige bebouwing aan de oneven (dus westelijke) kant van de Julianastraat plaats gaan maken voor nieuwbouw. Ten noorden van het spoor, aan de Stationsstraat, wordt een nu braakliggend terrein een nieuwbouwkavel. De ontwikkelaars van de nieuwbouw zullen rekeningen moeten houden met de aanwezige spoortrillingen, bij voorkeur door op trillingsreductie gerichte constructiekeuzes te maken en eventueel door extra maatregelen aan de fundering te nemen waardoor in de woningen de trillingsniveaus zullen voldoen aan de in ref. [1] geformuleerde eis voor nieuwbouw in de Spoorzone. Die eis luidt:

$$V_{\max} \leq 0,20$$

conform SBR trillingsrichtlijn B (ref [5]), waarbij $V_{\max}$ bij voorkeur wordt bepaald volgens de bepalingmethode behorende bij de Bts (ref [4]).

N.B.: in Ref. [1] is de eis geformuleerd als " $< 0,2$ ". Dit is naar de letter van de richtlijn maar die formulering wordt in de praktijk verschillend geïnterpreteerd. De laatste jaren is bovenstaande interpretatie en formulering gangbaar geworden.

Ter informatie wordt de ontwikkelaars in deze paragraaf prognoses aangereikt. Vanwege de rol die de constructie van het gebouw speelt in de sterkte van de trillingen zijn de ontwikkelaars daarmee niet ontslagen van de taak zelf een prognose op te stellen met de juiste gegevens over hun gebouw.

In tabel 3 worden de prognoses gepresenteerd. De waardes worden gegeven voor de bouwblokken 1, 2 en 3 en voor het blok ten noorden van het spoor.

Het gaat om de volgende twee grootheden en hun 95% betrouwbaarheidsintervallen.

- V_{rms} op maaiveld. Deze output van Ours betreft een gemiddelde waarde die gebruikt wordt in berekeningen en die zich goed laat vergelijken met metingen.
- $V_{\max}$ op de fundering van een "standaard" tweelaags eengezinswoning met betonnen wanden en vloeren. Voor de fundering is ook een dominante frequentie beschikbaar.

Tabel 4: niveaus in de toekomstige situatie op maaiveld en op de fundering van een standaard betonnen eengezinswoning

	$V_{\text{rms,maaiveld}}$	$V_{\text{max,fundering}}$	
Blok 1	$0,26 \pm 0,15$	$0,21 \pm 0,06$	@8 Hz
Blok 2	$0,12 \pm 0,05$	$0,17 \pm 0,05$	@8 Hz
Blok 3	$0,09 \pm 0,05$	$0,12 \pm 0,04$	@8 Hz
Blok Noord	$0,26 \pm 0,15$	$0,17 \pm 0,05$	@8 Hz



Figuur 8: schematisch overzicht van het zuidelijke kavel waar nieuwbouw is gepland

De eis ($V_{\max} \leq 0,20$) betreft het trillingsniveau op de vloeren van verblijfsruimten in de woningen in de nieuwbouw. Vloeren zullen in de regel sterker trillingen, bovendien zullen hogere verdiepingen sterker trillen in horizontale richting. De te toetsen $V_{\max}$ zal dus in de praktijk hoger liggen dan de waarden in de tabel (die immers over maaiveld en fundering gaan) tenzij constructieve maatregelen worden genomen.

Tabel 3 geeft de trillingsdeskundige inzicht in de mate van ernst van de situatie. Op grond hiervan kan worden ingeschat in hoeverre constructieve aanpassingen nodig zijn dan wel wat de aard daarvan zal zijn, gegeven kennis van een voorlopig ontwerp van een gebouw. Tevens kan de aard van een uit te voeren onderzoek worden ingeschat: meten en/of globale berekeningen en/of detailberekeningen.

Dat bijvoorbeeld in Blok 1 het funderingsniveau hoger ligt dan de eis (bovengrens van de voorspelling hanterend: $0,21 + 0,06 = 0,27$) betekent dat er waarschijnlijk maatregelen nodig zijn in de gebouwconstructie. Voorbeelden van zulke maatregelen zijn: afvering in de fundering of diepe (bijv. >20 meter) en dikke (bijv. >1 meter doorsnee) palen.

Dat bijvoorbeeld in Blok 2 het funderingsniveau (bovengrens van de voorspelling) ongeveer op de eis ligt, met een dominante frequentie van 8 Hz, betekent dat de vloeren dermate stijf en/of met een dermate kleine overspanning moeten worden ontworpen dat hun eerste mode boven bijvoorbeeld de 16 Hz komt te liggen.



Figure 9: noordelijk nieuwbouwkavel (blauw)

Een trillingsonderzoek om aan te tonen dat aan de eis wordt voldaan, eventueel na maatregelen, kan er als volgt uitzien:

1. Als immissieniveau wordt tabel 3 gehanteerd OF er worden trillingsmetingen uitgevoerd op de bouwlocatie.
2. Er wordt een dynamisch model van het gebouw gemaakt. Dat kan de gebouwmodule van OURS zijn, dat kan een eigen analytisch model zijn, dat kan een numeriek model zijn.
3. Immissie en model worden gecombineerd om de trillingsniveaus op de vloeren van woonvertrekken in het gebouw te bepalen. Dat kan op vele manieren. Een mogelijkheid is om OURS te gebruiken, waarbij eventueel zelf eigenfrequenties van de vloeren worden berekend en ingevoerd en de OURS prognose al dan niet wordt geijkt met de zelf uitgevoerde trillingsmetingen op locatie aan de hand van de grootheid $V_{rms, maaiveld}$.
4. Er wordt rekenschap genomen van de onzekerheden in dit proces. Gangbaar is uiteindelijk een 95% bovengrens te toetsen. De +/- waarden in tabel 3 betreffen 95% boven- en ondergrenzen.

6. Conclusies en aanbevelingen

De spooronderdoorgang is geen geleider van trillingen.

De spooronderdoorgang reflecteert bodemtrillingen in de 8 Hz octaafband en hoger.

Op alle adressen neemt het tijdgemiddelde trillingsniveau V_{per} af.

Op twee adressen is er sprake van een verwachte toename van het trillingsniveau V_{max} . De toename is ruim onder de 30%. Op alle andere adressen neemt het trillingsniveau af.

Op alle adressen wordt naar verwachting voldaan aan het toetsingskader Bts (Beleidsregel Trillinghinder Spoor).

Ofschoon de resultaten tot stand zijn gekomen met behulp van de best beschikbare prognosemethoden resteert er altijd een modelonzekerheid. Daardoor blijft er een kans dat achteraf blijkt dat op de twee eerder genoemde adressen toch sprake is van een toename van meer dan 30% en dus niet wordt voldaan aan de Bts. Bij zo'n toename dienen volgens de Bts maatregelen te worden overwogen. Een gangbare maatregel die ook pas achteraf, bijv. op basis van een nameting, kan worden uitgevoerd zijn constructieve aanpassingen aan het pand, zoals het verstijven van vloeren.

Referenties

- [1] Koopman, A: *Spoortrillingen Spoorzone Rijen – Prognose van het effect van de spooronderdoorgang*, Level A&V rapport LA.200507.R02, 9 november 2020
- [2] Koopman, A, de Jong, P.: *Detailberekening Spoorkruising N631 Rijen – reflectie en geleiding van trillingen door de onderdoorgang*, Level A&V rapport LA.200606.R03, 7 december 2020
- [3] *Beleidsregel trillingshinder spoor*, Staatscourant 27 maart 2014 <https://wetten.overheid.nl/BWBR0031466/2014-03-27>
- [4] *Level memo*, LA.131001a.M04, 13 april 2018 <https://leveltools.nl/files/LA.131001a.M04.42.pdf>
- [5] SBR trillingsrichtlijn B : Hinder voor personen in gebouwen : 2002 <https://www.crow.nl/online-kennis-tools/kennismodule-funderingen-en-trillingen>