

Spoorkruising N631 Rijen

Trillingen in de omgeving vanwege treinpassages



plaats & datum: Eindhoven, 2 februari 2021
versie: definitief
opdrachtgever: Anteagroup

auteur(s): drs. Arnold Koopman
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. Risico's.....	5
4. Toetsingskader	6
5. Onderzoeksmethode.....	12
6. Resultaten en toetsing.....	17
7. Conclusies en advies	19
Referenties	20

1. Inleiding

In Rijen kruist de provinciale weg N631 de spoorlijn Breda-Tilburg middels een gelijkvloerse spoorwegovergang. Deze spoorwegovergang gaat vervangen worden door een spooronderdoorgang.

Treinpassages veroorzaken bodemtrillingen in de omgeving. Afhankelijk van de trillingssterkte kunnen die hinderlijk zijn of zelfs tot schade aan gebouwen leiden. Het is dan ook gebruikelijk bij een plan voor een aanmerkelijke wijziging van het spoor onderzoek te doen naar het effect op trillingen in de omgeving. Indien nodig kunnen dan maatregelen worden opgenomen in het ontwerp. In Rijen zijn op dit moment veel klachten over trillingen vanwege treinpassages. Deze hebben aanleiding gegeven tot een aantal onderzoeken. De spoorkruizing van de N631 is daarbij nog niet specifiek in beeld geweest. Er is dus alle reden voor een trillingsonderzoek naar dit plan.

Er is een “quick scan” uitgevoerd met de vraag welke gevolgen de vervanging heeft voor trillingen in de omgeving (zie ref [1]). De quick scan gaf aanleiding om de situatie in meer detail te bestuderen. In eerste instantie door een trillingsmeting uit te voeren teneinde het gebruikte model te kalibreren en de huidige situatie goed vast te leggen (zie ref [2]). Vervolgens door de effecten van de spoorondergang op bodemtrillingen met een gedetailleerd numeriek model te onderzoeken (zie ref[3]). De resultaten hiervan zijn verwerkt in het model van de quick scan en dit rapport vormt daarvan het verslag.

De quick scan had als aanbeveling, naast detailonderzoek, een keuze te maken tussen de beschikbare toetsingskaders voor trillingshinder vanwege treinpassages: SBR richtlijn B dan wel de Bts (Beleidsregel trillinghinder spoor). In hoofdstuk 3 van dit rapport worden de twee toetsingskaders toegelicht en vergeleken en wordt een keuze geadviseerd.



2. Doel en uitgangspunten

Het onderzoek heeft als doel:

- Vaststellen wat de te verwachten invloed is van de spooronderdoorgang op de kans op hinder en bouwkundige schade vanwege treintrillingen.

Buiten de scope van dit onderzoek vallen:

- Trillingen in de bouwfase. Deze behoeven in de ontwerpfase op deze locatie (relatief grote afstand tot omringende bebouwing) nog geen aandacht en worden in de regel tijdens de bouw beheerst door middel van monitoring (continu meten en bij overschrijding stilleggen).
- Andere effecten van trillingen: verstoring van apparatuur, schade aan kunstcollecties, hinder door bodemgeluid. Voor zover bekend is er in de directe omgeving geen sprake van trillingsgevoelige apparatuur of van kunstcollecties: er zijn geen musea en er zijn geen ziekenhuizen, laboratoria of industrieën met optische of fijnmechanische productieprocessen in een straal van 200 meter aanwezig. Bodemgeluid speelt alleen een rol wanneer binnen de woning direct geluid van treinpassages afwezig is (zoals bij spoortunnels). Rattle (secundair geluid dat veroorzaakt wordt door trillende huisraad of trillende bouwdeelen) wordt gezien als onderdeel van trillingshinder en daarmee van de toetsingskaders voor trillingshinder.

Uitgangspunten betreffende het toetsingskader worden beschreven in hoofdstuk 4.

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.

- 442272-FS-0-0101-A1 verl. (0594x1189).pdf
- 442272-S-0-0102, Optimalisatie.pdf
- 442272-S-1-0102 ontwerp enkelstrooksrotonde.pdf
- 442272-S-1-0103 ontwerp enkelstrooksrotonde.pdf
- 453780-DOC-0002_v0.1.pdf
- 453780-DOC-0002_v0.2.pdf
- 453780-DOC-0002_v0.2_DSN AS dek.pdf
- 20200304-435780.100-rap-Geotechnisch onderzoek spoorwegonderdoorgang Oosterhoutseweg te Rijen-R1.0.pdf
- Vooropnames van BouwRisk, projectnr BR196265 (26 woningen, Oosterhoutseweg, Oranjeplein, Pastoor Gillisstraat)

3. Risico's

Het wijzigen van de gelijkvloerse spoorwegovergang in een spooronderdoorgang heeft **mogelijk** de volgende negatieve effecten:

- A. Treintrillingen nemen toe door de wijziging naar een onderdoorgang.
- B. Toename van trillingen leidt tot toename van hinder.
- C. Toename van trillingen leidt tot bouwkundige schade.

Ad A): De huidige constructie is een spoorwegovergang. Mogelijk optredende negatieve effecten van de wijziging zijn:

- De onderdoorgang zorgt voor een verslechtering van de spoorbaan, waardoor meer trillingen ontstaan (NB: het is ook mogelijk dat de onderdoorgang juist een positief effect heeft op de spoorbaan)
- De onderdoorgang geeft trillingen beter door naar de omgeving
- De onderdoorgang kaatst trillingen terug naar de omgeving

Ad B): Trillingen die nu nog niet voelbaar zijn kunnen voelbaar en mogelijk hinderlijk worden. Trillingen die nu al voelbaar zijn kunnen sterker worden en daardoor hinderlijker.

Ad C): Trillingen op de fundering met een bepaalde minimum sterkte kunnen leiden tot een niet verwaarloosbare kans op schade. Een mogelijke toename vanwege de onderdoorgang zou bij sommige woningen kunnen leiden tot een overschrijding van die drempelwaarde.

Om te bepalen wat de kans is dat deze effecten optreden wordt onderzocht wat de huidige trillingsniveaus zijn, wordt gekwantificeerd hoe de wijziging dat beïnvloedt (hoofdstuk 5) en worden de prognoses die dat oplevert (hoofdstuk 6) getoetst aan richtlijnen voor schade en hinder (zie hoofdstuk 4).



Figuur 1: onderzoeksgebied

4. Toetsingskader

Wat is er beschikbaar?

Voor trillingen in de omgeving van spoorlijnen vanwege treinpassages is er geen specifieke wetgeving.

De Stichting Bouwresearch (**SBR**) heeft in 1993 richtlijnen uitgegeven voor trillingen in bouwwerken waarbij trillingen vanwege spoorverkeer binnen hun toepassingsgebied vallen. Ze zijn herzien in 2002. De richtlijnen gaan over het voorkomen van bouwkundige schade (ref. [4]), hinder (ref. [5]) en verstoring van apparatuur (ref. [6]). Richtlijn A is in 2017 opnieuw herzien.

- SBR Trillingsrichtlijn A : Schade aan bouwwerken : 2017
- SBR Trillingsrichtlijn B : Hinder voor personen in gebouwen : 2002
- SBR Trillingsrichtlijn C : Verstoring van apparatuur : 2002

De richtlijnen hebben kracht van jurisprudentie. Ze zijn sinds 1993 veelvuldig toegepast in verband met spoorverkeer en andere bronnen van trillingen en hebben daarbij vaak een rol gespeeld in bestuursrechtelijke en civielrechtelijke procedures. Dat heeft nooit geleid tot gerechtelijke uitspraken waarin het toepassen van een van deze richtlijnen wordt afgewezen. De richtlijnen zijn ingeburgerd geraakt en worden aangewezen in plannen, vergunningen en besluiten en worden toegepast in de planfase en de uitvoering van bouwwerkzaamheden en gebruikt bij klachtenafhandeling. Er zijn tal van leveranciers op de markt verschenen van apparatuur die kunnen meten volgens de richtlijnen en er zijn tal van bureaus met de kennis en middelen om onderzoek uit te voeren volgens deze richtlijnen. De richtlijnen hebben aan de basis gelegen van de trillingsparagrafen van de Tracébesluiten van de Betuweroute en de HSL Zuid en worden sindsdien aangewezen in spoorse tracébesluiten.

De Minister van Infrastructuur en Waterstaat heeft sinds 2012 een eigen beleidsregel voor trillingen vanwege spoorverkeer: de Beleidsregel Trillinghinder Spoor (**Bts**, zie ref [7]). Deze beleidsregel gaat alleen over het voorkomen van hinder en steunt zwaar op SBR richtlijn B door er veel hoofdstukken en paragrafen van aan te wijzen. De Bts wijst niet de gehele SBR B aan: waar het gaat om de beoordeling van een situatie hanteert de Bts eigen waarden en wijzen. De Bts gaat verder dan de SBR B in de zin dat hij invult hoe met een beoordeling om moet worden gegaan.

Bovenstaande regelgeving (SBR en Bts) gaat over de trillingsbelasting van een gebouw. De fysische staat van een gebouw (zijn sterkte, stijfheid en massa) speelt een rol bij het al dan niet optreden van de te voorkomen nadelige effecten (schade, hinder, apparatuurstoring). Dat zit impliciet verwerkt in deze regelgeving door de beoordeling te laten plaatsvinden in het pand, daar waar apparatuur of personen zich bevinden (Bts, SBR B en C) of door criteria afhankelijk te maken van de aard en staat van het bouwwerk (SBR A). Er is geen expliciete regelgeving voor gebouwen, bijvoorbeeld in het Bouwbesluit, voor de gevoeligheid voor trillingen van een bouwwerk. Het enige dat beschikbaar is en door constructeurs wordt gebruikt bij het ontwerp van gebouwen zijn eisen aan vloeren in verband met lopen en springen. Deze eisen zijn echter weinig relevant voor trillingen van andere bronnen.

SBR versus Bts

Voor de aspecten schade aan gebouwen en verstoring van apparatuur is er geen (binnenlands) alternatief beschikbaar voor de SBR richtlijnen A en C. Voor het aspect hinder is er, als het gaat om spoorverkeer, een keuze: de Bts of de SBR B. Beide worden hier kort toegelicht.

SBR trillingsrichtlijn B

Deze richtlijn is, net als richtlijnen A en C, een “meet- en beoordelingsrichtlijn”. Het schrijft voor hoe trillingsmeting moet worden uitgevoerd en uitgewerkt tot twee beoordelingsmaten, V_{max} en V_{per} , en hoe deze dan, afhankelijk van de omstandigheden, moeten worden beoordeeld.

V_{max} is de maximale trillingssterkte die is opgetreden tijdens de meting. Er dient uiteraard tijdens een voor de bron representatieve periode te worden gemeten.

V_{per} is een gemiddelde trillingssterkte die optreedt tijdens een periode (zijnde dag, avond of nacht).

Metingen vinden plaats daar waar trillingen worden ervaren: op vloeren in de verblijfsgebieden van een gebouw.

De SBR B hanteert een soort stoplichtmodel: indien V_{max} onder een onderste streefwaarde (“A1”) ligt is de kans op hinder acceptabel. Indien V_{max} boven een bovenste streefwaarde ligt (A2), dan is er sprake van een hinderlijke situatie en dienen vervolgstappen te worden ondernomen. Deze vervolgstappen worden verder niet in detail beschreven anders dan in de informatief bedoelde Bijlage 5. Tussen de streefwaardes in (stoplichtkleur oranje) komt V_{per} in beeld. Deze dient te voldoen aan de daarvoor gestelde streefwaarde A3.

De streefwaarden A1, A2 en A3 hebben waardes die afhangen van de situatie: type bron, type gebouwfunctie, moment van de dag en de temporaliteit van de situatie (is deze nieuw, bestaand of gewijzigd). Voor spoorverkeer pakt A3 (voor V_{per}) dermate ruim uit dat deze alleen bij zeer intensief bereiden veelsporige trajecten een rol kan spelen. Het spoor door Rijen behoort daar niet toe. Daarmee is A2 (voor V_{max}) de facto het maatgevende criterium.

Voor woningen rond het spoor komt de beoordeling van bestaande situaties neer op:

$V_{max} \leq 0,8$ (overdag en 's avonds)

$V_{max} \leq 0,4$ ('s nachts)

Bij gewijzigde situaties hanteert de SBR het principe van stand still, althans indien in de huidige situatie wordt voldaan. Indien in de huidige situatie niet wordt voldaan dient in de gewijzigde situatie wel te worden voldaan.

Beleidsregel Trillinghinder Spoor (Bts)

Met de Bts is bedoeld de SBR B aan te vullen en te verduidelijken. Het heeft een complexere structuur. Naast de 11 artikelen en een bijlage is er sprake van toelichtingen, wordt de SBR B aangewezen en wordt er verwezen naar een extern document als het gaat om de bepaling van beoordelingsmaat V_{max} (zie figuur 2).

De voor dit project relevante belangrijkste verschillen met de SBR B zijn de volgende:

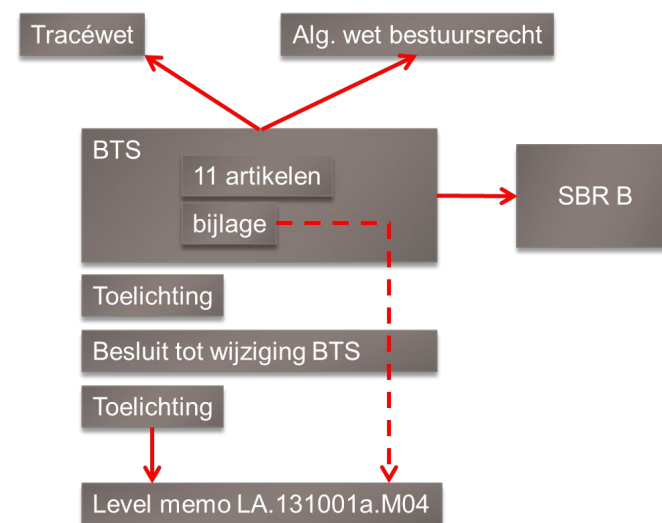
- De beoordeling van een gewijzigde situatie is verder uitgewerkt.
 - Toenames van V_{max} van minder dan 30% worden gekenschetst als niet merkbaar en gelden als “stand still”.
 - “Stand still” als criterium geldt, i.t.t. de SBR B, ook indien in de huidige situatie niet wordt voldaan.
 - Samengevat zijn er geen consequenties voor een project zolang deze niet leidt tot toenames van meer dan 30%.
 - Bij toenames van meer dan 30% (“merkbare toenames”) dienen maatregelen te worden overwogen waardoor de toenames tot onder de 30% worden gebracht en V_{max} gaat voldoen aan A2.
 - Voor V_{per} geldt dat elke toename boven A3 dient te worden bestreden, ook die minder dan 30%.
- De follow-up is verder uitgewerkt.
 - Indien maatregelen moeten worden ontworpen dienen deze op doelmatigheid te worden getoetst. Hoe deze kosten-batenafweging precies moet worden uitgevoerd is echter niet omschreven.
 - Na voltooiing van het project dient binnen een jaar de blootstelling opnieuw te worden vastgesteld. Indien nodig dienen dan aanvullende maatregelen te worden getroffen (na onderwerping aan de doelmatigheidsafweging).
 - Een V_{max} van meer dan 3,2 dient ongeacht doelmatigheid te worden bestreden.

Tabel 1 geeft een verder, niet uitputtend, overzicht van de verschillen en overeenkomsten.

Als het gaat om de toetsing kan de Bts anders uitpakken dan de SBR. Dat heeft de volgende oorzaken:

- De V_{max} bepaald volgens Bts zal anders zijn dan die volgens SBR. Soms iets hoger, soms iets lager. Gemiddeld (over locaties in het land) zijn de verschillen rond de 10%. Soms zijn er uitschieters.
- Bij een gewijzigde situatie voldoet deze volgens Bts altijd zolang de toename van V_{max} maar niet merkbaar is, dus niet meer dan 30%, en zolang de toename van het langdurig gemiddelde, V_{per} , maar niet meer is dan 0%. Overigens dienen wat betreft de toename opeenvolgende projecten rekening met elkaar te houden: als er bijvoorbeeld al een toename van V_{max} van 20% is geweest is er nog maar 10% ruimte over voor een volgende wijziging.

Als het gaat om de follow-up blijkt in de praktijk, als Tracébesluiten van voor en van na de Bts met elkaar worden vergeleken, de Bts vaker te leiden tot de daadwerkelijke uitvoering van maatregelen. Als een situatie niet voldoet geeft de SBR in Bijlage 5 een vrij “zachte” handreiking hoe daar mee om kan worden gegaan. De Bts is strenger en vraagt om het opnemen van maatregelen in het plan en het aantonen van doelmatigheid.



Figuur 2: Bts en zijn omgeving

Tabel 1: verschillen en overeenkomsten tussen SBR B en Bts

aspect	SBR trillingsrichtlijn B (SBR B)	Beleidsregel Trillinghinder Spoor (Bts)
Doel	Beoordelen situatie	Voorkomen dat een (tracénbesluitplichtig) spoorproject extra trillingshinder veroorzaakt
Trillingsbronnen	Elke mogelijke bron buiten het vertrek	Treinpassages
Gebouwfuncties	Wonen, kantoor, onderwijs, gezondheidszorg, bijeenkomst, kritische werkruimten	Wonen, kantoor, onderwijs, gezondheidszorg, bijeenkomst, kritische werkruimten
Temporaliteit	Nieuwe bron Wijziging aan bron Nieuwe gebouwen Bestaande situaties	Nieuw spoor Wijzigingen aan het spoor
Beoogd primair gebruiksmoment	Zodra trillingen zich voordoen	Planfase
Beoordelingsgrootheden	V _{max} , V _{per}	V _{max} , V _{per} , Toename
Criteria	Streefwaarden A1, A2 en A3	Streefwaarden A1 en A3, A2 heet nu een grenswaarde De tabelwaardes hiervoor zijn niet veranderd
Bepaling van de toetswaarden, op grond van metingen	Metten gedurende een “representatieve” periode (spoor: 1 week).	Metten gedurende 1 of 2 weken met een statistische naverwerking die gericht is op reproduceerbaarheid.
Bepaling van de toetswaarden op grond van berekeningen	Geen speciale voorzieningen.	De bepaling van V _{max} en V _{per} is gebaseerd op een gemiddelde meetwaarde en statistiek. Dat maakt het beter mogelijk met modellen deze waardes te voorspellen.
Afweging toelaatbaarheid	Bijlage 5 met daarin een hinderkwalificatietabel en oproep tot overleg tussen betrokken partijen	Artikel 9 over doelmatigheid op grond van kosten-baten analyse van ontworpen maatregelen

Keuze

De Bts is het (voorlopig) eindpunt van een proces waarin bij het tot stand komen van tracébesluiten werd geworsteld met het toepassen van een meetrichtlijn in een plansituatie. De issues die de Bts poogt op te lossen gelden onverkort voor andere spoorse plannen dan tracébesluitplichtige, zoals de realisatie van een onderdoorgang. Deze zijn:

- In veel woningen langs het spoor wordt in de bestaande situatie niet voldaan aan de richtlijn. In hoeverre dienen spoorplannen de taak op zich te nemen dit te bestrijden?
- De V_{max} , zoals de SBR voorschrijft die te meten, wordt bepaald door de ene trein in een week, vaak een goederentrein. Dat maakt V_{max} erg gevoelig voor toevallige omstandigheden. Per week zal de waarde verschillen.
- Een kleine wijziging aan het spoor (1 meter verplaatsing bijvoorbeeld) leidt rekenkundig meteen tot het doorbreken van de stand still, terwijl het de vraag is of de omgeving daar wel iets van merkt.
- Gezien de begrensde betrouwbaarheid van prognoses kan het opportuun zijn de toepassing van een maatregel uit te stellen tot na realisatie van het project, zodat kan worden vastgesteld of de maatregel nog echt nodig is. Gezien de focus, bij gewijzigde situaties, op stand still, dienen dan wel nulopnames en oplevertoetsen te worden uitgevoerd en met voldoende betrouwbaarheid (reproduceerbaarheid) om nauwkeurig een toename te kunnen vaststellen.
- Wanneer is een overschrijding toelaatbaar?

Om die redenen is het te prefereren de Bts te hanteren: de kennis en ervaring die tot stand is gekomen sinds 2002 (de laatste keer dat de SBR B is herzien) is er in samen gebracht.

Indien besloten wordt de Bts te hanteren en onderzoeksresultaten aanleiding geven tot het nemen van maatregelen dient een doelmatigheidsafweging te worden opgesteld waarin zorgvuldigheid wordt betracht bij de beprijzing van de reductie in trillingsniveau.

Het advies is de Bts toe te passen en indien er maatregelen worden ontworpen een doelmatigheidsafweging op te stellen.

Samenvatting van de hinderbeoordeling

De eisen zijn voor de bestaande woningen:

Maatregelen dienen te worden overwogen indien één of meerdere van het volgende geldt:

- $V_{max, straks} > 0,2$ en toename $V_{max} > 30\%$
- $V_{per, straks} > 0,1$ en toename $V_{per} > 0\%$

Doel van de maatregelen is:

- $V_{max} \leq 0,4$ en toename $V_{max} < 30\%$
- Toename $V_{per} \leq 0\%$

Beoordeling kans op schade

Voor de beoordeling van de kans op schade is (alleen) SBR trillingsrichtlijn A beschikbaar.

Net als de SBR B is het een meet- en beoordelingsrichtlijn. Anders dan de SBR B kent het grenswaarden (in plaats van streefwaarden) en zijn deze conservatief. Dat betekent dat zolang trillingen onder de grenswaarden blijven de kans op schade voldoende klein is. "Voldoende klein" is een kans als het risico (kans maal effect) "maatschappelijk acceptabel" wordt geacht.

De beoordelingsmaat is **V_{top}**. Dit is de hoogst gemeten snelheidsamplitude. Het verschil met V_{max} is dat V_{top} een direct meetresultaat is terwijl V_{max} enkele nabewerkingen kent in verband met de menselijke perceptie (zoals de A-weging bij geluid).

Bij trillingsgevoelige funderingen, waar kans is op zetting van de fundering door trillingen, is ook de hoogst gemeten versnellingsamplitude, A_{top}, van belang.

De grenswaarde voor V_{top} hangt af van de aard van de trillingen (waaronder de dominante frequentie die er in zit) en de aard van de constructie. Voor gebouwen in slechte staat of met een formele monumentale status wordt een veiligheidsfactor (van 1,7) in rekening gebracht.

Bij toetsing wordt ook rekening gehouden met de uitgebreidheid van de meetopstelling. Gangbaar is "indicatief" te meten, dat betekent met 1 sensor aan de fundering. Dat leidt tot een toeslagfactor op de metingen van 1,6.

In dit geval zijn voor de toetsing de volgende keuzes gemaakt:

- Continue trillingen (dominante frequentie volgt uit de prognose)
- Gebouwcategorie 2 (metselwerk)
- Staat en status van de gebouwen:
 - o De Vijf Eiken: monumentale status (gemeentelijk)
 - o Overige panden: normale staat en geen monumentale status
- Meting: indicatief (voorspelling van trillingsniveau van de fundering)

Met deze uitgangspunten is **de rekenwaarde voor de grenswaarde**:

- o 1,2 mm/s voor De Vijf Eiken
- o 2,0 mm/s voor de overige panden

voor trillingen met een dominante frequentie onder de 10 Hz. Voor hogere frequenties is de grenswaarde ruimer.

De **rekenwaarde voor de meetwaarde** is 1,6 maal de berekende waarde aan de fundering.

De kans op schade is acceptabel klein indien de rekenwaarde voor de meetwaarde kleiner is dan de rekenwaarde voor de grenswaarde.

5. Onderzoeksmethode

Het effect van de komst van de spooronderdoorgang op trillingen in de omgeving wordt onderzocht door de huidige trillingsniveaus en de toekomstige niveaus te bepalen en deze onderling te vergelijken.

Algemeen gangbaar voor trillingsonderzoek is een gefaseerde aanpak:

1. **Scoping:** het leggen van een afstandscontour om te bepalen welke panden onderzoek vereisen.
2. **Screening:** het bepalen welke situaties mogelijk niet gaan voldoen aan het beoordelingskader.
3. **Detailonderzoek:** het met precisie onderzoeken van de uit screening komende situaties, met als mogelijke uitkomsten een ontworpen maatregel dan wel een vaststelling van alsnog voldoen.

Het onderzoek heeft deze drie fasen doorlopen.

Scoping

Er is een contour van 150 meter getrokken rond de onderdoorgang (zie figuur 1) en daarbinnen wordt gezocht naar mogelijke probleemlocaties. 150 meter is op dit moment de gangbare contourafstand bij spoor trillingsonderzoek. Afhankelijk van de resultaten van de screening kan de afstand in tweede instantie nog worden vergroot.

Binnen de contour zijn er drie gebieden te onderscheiden:

- het gebied ten zuiden van het spoor, daar zijn geen woningen binnen de contour
- de noordwestelijke oksel van de N631 en het spoor, daar is alleen de locatie De Vijf Eiken met daarop mogelijk een woonfunctie
- de noordoostelijke oksel met daarin een woonbuurt

In de woonbuurt zijn 4 “gidspanden” geselecteerd voor het screeningonderzoek. Ten opzichte van de rest van de buurt zijn ze maatgevend wat betreft de trillingsbelasting in de huidige en toekomstige situatie gezien hun ligging ten opzichte van de spoorwegovergang en de geplande onderdoorgang en zijn ze representatief wat betreft gebouwconstructie en de rol die dat speelt in het versterken en verzwakken van bodemtrillingen.

De gidspanden, tezamen met Vijfeiken, vormen de onderzoeksadressen:

Pastoor Gillisstraat 149 en 151
Oosterhoutseweg 8
Oosterhoutseweg 55 (De Vijf Eiken)
Oranjeplein 26

Screening

Voor het bepalen van de huidige en toekomstige niveaus is er geen uniforme methode. Soms wordt er veel gemeten, soms wordt er veel gerekend en allerlei combinaties van die twee. Omdat deze "state of the art" willekeur in zich herbergt heeft het Ministerie van IenW aan RIVM opdracht gegeven een uniform rekenmodel te bouwen voor de screening fase. Dit model is nu beschikbaar onder de naam **Ours** ("ontwikkeling uniform rekenmodel spoortrillingen").

De berekeningen aan de vijf adressen zijn uitgevoerd met Ours.

Het model levert bij de resultaten betrouwbaarheidsmarges. Indien de screening, de marges "conservatief" toepassend, locaties oplevert voor nader onderzoek (fase 3) dan is het opportuun eerst de betrouwbaarheid te vergroten door het model te kalibreren met behulp van een meting ter plekke. Deze stap is ook in dit onderzoek genomen. Aangezien er geen meting beschikbaar was is deze alsnog uitgevoerd (ref [2]).

Ours kan niet elke situatie modelleren: de spooronderdoorgang kan niet in detail in het model worden ingevoerd. Met de volgende work around is er in de screening fase toch een prognose voor de toekomstige situatie tot stand gebracht.

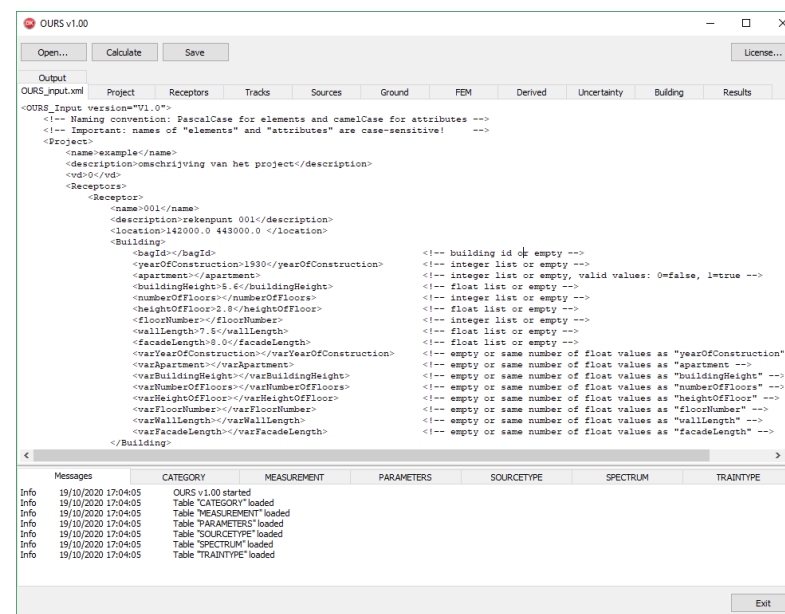
1. De mogelijke fysische effecten van de onderdoorgang zijn in kaart gebracht.
2. Die effecten zijn extern (buiten) Ours geanalyseerd en vertaald naar een voor Ours equivalente situatie
3. Die equivalente situaties zijn in Ours gemodelleerd.

De volgende effecten zijn in rekening gebracht:

- a) De wanden van de onderdoorgang werken als een trillingsgeleider naar de omgeving
- b) De wanden van de onderdoorgang reflecteren trillingen

Dit zijn potentieel versterkende effecten. Andere effecten zijn:

- c) De onderdoorgang schijnt trillingen (afkomstige van de andere kant) af. Dit effect wordt als gering geschat, niet omdat er geen afscherming is maar omdat er altijd ook nog spoor aan dezelfde kant en dichtbij ligt en de Vmax daardoor voornamelijk bepaald zal worden.
- d) De onderdoorgang betekent een verandering in de spooropbouw, ten opzichte van de huidige spoorwegovergang. Dit effect kan direct worden berekend met Ours.



Figuur 3: user interface van Ours

Invoer

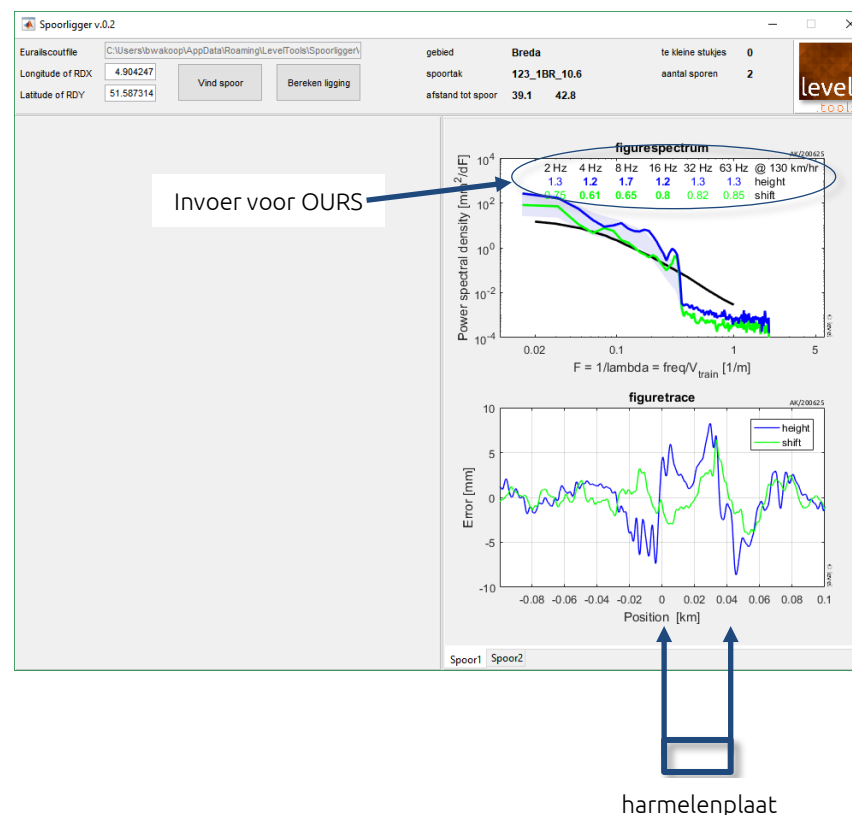
Treintypes

- VIRM, 140 km/uur, 1 per uur per richting, van 6:00 tot 00:00
- ICM, als VIRM, 140 km/uur, 1 per uur per richting, van 6:00 tot 00:00
- ICR+TRAXX, 140 km/uur, 2 per uur per richting, van 6:00 tot 00:00
- FLIRT/SLT, 120 km/uur, 2 per uur per richting, van 5:30 tot 00:30
- Container/bont, 90 km/uur, 6 overdag, 3 's avonds, 12 's nachts
- Ketel, 90 km/uur, per week: 1 overdag, 1 's avonds, 2 's nachts

Types en hoeveelheden zijn gebaseerd op een visuele inspectie die onderdeel vormde van het uitwerken van de trillingsmeting (ref [2]). De snelheden betreffen de baanvaknelheden voor het betreffende type materieel.

Spoorbaan

De oneffenheid van het spoor speelt een grote rol in de mate waarin spoortrillingen ontstaan. Het spoor is een combinatie van “doorgaand” spoor en (in de huidige situatie) een spoorwegovergang. Op basis van metingen in 2018 door het meetrijtuig van Eurailscout is de kwaliteit van het doorgaande spoor en de kwaliteit van de spoorwegovergang gekarakteriseerd (zie figuur 4) en ingevoerd in Ours. Voor de invoer van de spoorligging hanteert Ours de parameter Cgeo: een correctiefactor, per trillingsfrequentie, waarin een locatie afwijkt van het Nederlandse gemiddelde. Tabel 2 vat de gebruikte waardes samen. Waardes groter dan 1 impliceren een spoorligging die slechter is dan het Nederlandse gemiddelde waardoor meer trillingen zullen ontstaan. Voor de toekomstige situatie is de verwachting dat de kwaliteit gelijk is aan het Nederlandse gemiddelde. Het spoor wordt immers opnieuw gelegd, de spoorwegovergang verdwijnt en het ballastspoor wordt over het spoorviaduct voortgezet. Bij slappe bodems is de kans groot dat er alsnog oneffenheid ontstaat bij de overgang van baan naar viaduct maar de stijve bodem van Rijen en de toepassing van stootplaten maakt de kans op oneffenheidsontwikkeling door stijfheidsvariatie in de onderbouw gering.



Figuur 4: analyse van de spoor kwaliteit op basis van meetrijtuigmetingen uit 2018 met behulp van de tool Spoorligger

Tabel 2: correctiefactoren voor de spoorkwaliteit

		2 Hz	4 Hz	8 Hz	16 Hz	32 Hz	63 Hz
Huidig doorgaand spoor	CgeoZ	1,30	1,17	1,74	1,24	1,33	1,26
	CgeoX	1,29	1,32	1,54	1,11	1,22	1,17
Huidige spoorwegovergang	CgeoZ	2,2	2,4	1,8	1,0	1	1
	CgeoX	1	1	1	1	1	1
Toekomstig spoor	CgeoZ	1	1	1	1	1	1
	CgeoX	1	1	1	1	1	1

Bodem

Ours baseert de beschrijving van de bodem op sonderingen in de omgeving die beschikbaar zijn in de Basisregistratie Ondergrond (BRO). Deze worden door Ours zelf verzameld.

Gebouwen

De vijf panden zijn als volgt gekarakteriseerd in Ours:

Pastoor Gillisstraat 149 en 151	houten vloeren, overspanningen tussen de 3 en 5 meter, 2 woonlagen, 10 meter diepte t.o.v. spoor, 6 meter breedte
Oosterhoutseweg 8	houten vloeren, overspanningen tussen de 3 en 5 meter, 3 woonlagen, 10 meter diepte t.o.v. spoor, 10 meter breedte
Oosterhoutseweg 55 (De Vijf Eiken)	houten vloeren, overspanningen tussen de 3 en 5 meter, 2 woonlagen, 10 meter diepte t.o.v. spoor, 10 meter breedte
Oranjeplein 26	betonnen vloeren, overspanningen tussen de 4 en 6 meter, 3 woonlagen, 10 meter diepte t.o.v. spoor, 6 meter breedte

Deze invoer betreft een schatting. Het model is vooral gevoelig voor de soort vloer (hout of beton), de overspanningslengte van de vloeren (waarvoor dus steeds een onzekerheidsmarge is ingevoerd) en het aantal lagen waar zich verblijfsruimten verbinden ("woonlagen"). De "diepte" betreft de lengte van stijve schijven loodrecht op het spoor zoals (metselwerk-) wanden. Met meer precisie de invoer bepalen heeft in dit geval weinig toegevoegde waarde omdat het hier voornamelijk "gidspanden" betreffen die model staan voor de hele buurt. Binnen die buurt is de variatie groter dan de bandbreedte van bovenstaande schattingen.

Ours bepaalt automatisch de kortste afstand van de panden tot het spoor en tot de spoorwegovergang.

Kalibratie van het model

Bij het onderzoekspand dat het dichtst bij de spoorwegovergang ligt en daarom op dit moment het zwaarst wordt belast en dat bovendien gidspand is voor de woonbuurt erachter, Pastoor Gillisstraat 151, zijn trillingsmetingen verricht om het model te kalibreren. Voor nadere verslaglegging hiervan: zie ref [2]. De resultaten uit dat onderzoek zijn overgenomen in hoofdstuk 6 van dit rapport.

Modellering van de onderdoorgang

De toekomstige spooronderdoorgang is op de volgende manieren gemodelleerd.

a) Het effect van trillingsgeleiding door de wanden

Trillingen in de spoorbaan kunnen ter plekke van de overgang van baan naar viaduct de wand intreden, zich voortplanten door de wand en vandaar weer afstralen naar de omgeving. Vanwege de hogere stijfheid en lagere demping van beton zal dit trillingspad effectiever zijn dan voortplanting door de bodem. Daar staat tegenover dat het alleen om trillingen zal gaan die in directe omgeving ontstaan van de kruising van baan en wand. Bovendien is het mogelijk dat de afstraling inefficiënt verloopt (waardoor in feite de trillingsenergie blijft opgesloten in de wand).

Om dit in Ours te modelleren wordt een spoor op de plaats van de wand gelegd. Dit brengt in rekening dat er weinig verlies is in de wand en een afstraling door de hele wand. De afstraalefficiëntie wordt conservatief op 1 gezet (alle energie treedt de bodem in). Om in rekening te brengen dat de energie slechts afkomstig is van een relatief kort stuk spoor (direct bij de wand) wordt de bron gekenschetst als een puntbron. Die kenschetsing beïnvloedt onbedoeld ook de berekening van de demping als functie van de afstand tot de wand maar bij de geringe afstanden waarbij de geleiding een verschil kan maken is dat effect, in Ours, gering.

b) Het effect van reflectie aan de wand

Trillingen van de spoorbaan die een woning voorlangs passeren kunnen via reflectie alsnog de woning bereiken en de trillingen die het pand direct hebben bereikt versterken. Dit wordt gemodelleerd volgens de zogenaamde "spiegelbronmethode". De spoorbaan wordt gespiegeld in de wand en de resulterende imaginaire tweede spoorbaan wordt als extra bron meegenomen in de berekeningen.

Detailonderzoek: de onderdoorgang

De twee gemodelleerde effecten van de onderdoorgang kennen elk een aspect die een grote invloed heeft op het effect, die erg afhankelijk is van de precieze vormgeving van de onderdoorgang maar waarvan op voorhand slechts een conservatieve inschatting te maken is:

- De afstraalefficiëntie van trillingen in de constructie van de onderdoorgang
- De effectiviteit van reflecties

Deze aspecten zijn in principe frequentie-afhankelijk. Bij lagere frequenties, waar de golflengtes langer zijn, is te verwachten dat golven niet reflecteren maar onder de tunnel doorspoelen. De vraag is bij welke frequentie het kantelpunt ligt. Evenzo is van de afstraalefficiëntie een golflengteafhankelijkheid dus een frequentieafhankelijkheid te verwachten.

Deze aspecten zijn ook afhankelijk van de geometrie van de tunnelbak (diepte van de wanden, wanddikte, scheefstand, etc.).

Deze twee aspecten zijn onderzocht in een detailstudie (ref [3]). De resultaten uit dat onderzoek zijn overgenomen in hoofdstuk 6 van dit rapport.

6. Resultaten en toetsing

Uit de achterliggende onderzoeken (referenties [2] en [3]) zijn de volgende resultaten overgenomen.

- Kalibratie: het trillingsniveau V_{max} gemeten *op de fundering* van Pastoor Gillisstraat 151 is 0,43 bij 16 Hz in de Z-richting. Maatgevend is de ICm+TRAXX. NB: normaal wordt V_{max} niet op de fundering bepaald. Voor kalibratiedoeleinden is de fundering echter meer geschikt omdat op dat punt het meest zuiver een immissie kan worden bepaald die ook representatief is voor overige woningen in de omgeving. V_{max} dient echter te worden beoordeeld (in meting en in model) op vloervelden. De gemeten V_{max} op het vloerveld is 0,87.
- De afstraalefficiëntie van de constructie van de onderdoorgang is 0%. Geleiding van trillingen door de constructie vormt dus geen overdrachtspad van betekenis.
- De reflectie-efficiëntie van de constructie is als volgt:

	2 Hz	4 Hz	8 Hz	16 Hz	32 Hz	63 Hz
Reflectie-efficiëntie	0%	0%	35%	70%	90%	90%

De niveaus die zijn berekend voor de bestaande situatie worden gepresenteerd in tabel 3. De sigma (σ) is een maat voor de onzekerheid (zie Handleiding Ours, ref. [8]). De V_{per} betreft de hoogste van die van dag, avond en nacht.

Voor de volledigheid worden de resultaten van de metingen op Pastoor Gillisstraat 151 ook gepresenteerd. De gemeten waardes liggen een sigma naast de berekende waardes. Deze afwijkingen drukken de verschillen uit tussen de modellering van dit gebouw in Ours en het werkelijke gedrag van dit pand.

Tabel 3: resultaten bestaande situatie

	V_{max} [-]		V_{per} [-]		$V_{top, fundering}$ [mm/s]	
	berekend	gemeten	berekend		berekend	gemeten
Pastoor Gillisstraat 149	1,15 $\sigma=0,26$	-	0,14 $\sigma=0,02$		0,95 $\sigma=0,21$	-
Pastoor Gillisstraat 151	1,15 $\sigma=0,26$	0,87	0,14 $\sigma=0,02$		0,95 $\sigma=0,21$	1,17 mm/s
Oosterhoutseweg 8	0,55 $\sigma=0,22$	-	0,06 $\sigma=0,01$		0,43 $\sigma=0,16$	-
Oosterhoutseweg 55	0,78 $\sigma=0,24$	-	0,07 $\sigma=0,01$		0,63 $\sigma=0,16$	-
Oranjepein 26	0,30 $\sigma=0,16$	-	0,010 $\sigma=0,002$		0,40 $\sigma=0,11$	-

De berekende toekomstige waardes worden gepresenteerd in tabel 4. Voor de schadebeoordeling wordt nu ook de toetswaarde V_d van V_{top} gepresenteerd. Daarin is de onzekerheid van de prognose verwerkt en het feit dat de waarde is bepaald op de fundering en daardoor overeenstemt met een meting volgens de “indicatieve” methode. Deze V_d kan direct worden vergeleken met de toetswaarde voor de grenswaarde (zie hoofdstuk 4). Omdat bij de schadetoetsing ook de dominante frequentie van belang is wordt deze ook gegeven in de V_d kolom.

Tabel 4: resultaten toekomstige situatie

	Vmax [-]				Vper [-]				Vtop,fundering [mm/s]					
	berekend		toename		berekend		toename		berekend		toetswaarde Vd		grenswaarde Vr	
Pastoor Gillisstraat 149	0,70	σ=0,20	-39%	σ=7%	0,10	σ=0,015	-27%	σ=6%	0,60	σ=0,13	1,20	@8Hz	2,0	@8Hz
Pastoor Gillisstraat 151	0,70	σ=0,14	-41%	σ=7%	0,10	σ=0,015	-27%	σ=6%	0,60	σ=0,13	1,20	@8Hz	2,0	@8Hz
Oosterhoutseweg 8	0,33	σ=0,14	-41%	σ=7%	0,022	σ=0,005	-62%	σ=9%	0,28	σ=0,08	0,61	@8Hz	2,0	@8Hz
Oosterhoutseweg 55	0,53	σ=0,19	-32%	σ=6%	0,030	σ=0,005	-60%	σ=9%	0,42	σ=0,11	0,89	@8Hz	1,2	@8Hz
Oranjepein 26	0,20	σ=0,12	-33%	σ=4%	0,004	σ=0,001	-60%	σ=9%	0,10	σ=0,07	0,55	@8Hz	2,0	@8Hz

De trillingsniveaus nemen volgens de berekeningen in de toekomst af. Dit is toe te schrijven aan verbeterde spoorkwaliteit die te verwachten is als het spoor niet langer een verkeersweg gelijkvloers kruist (zie tabel 2). Deze afname van de bronsterkte is groter dan de toename vanwege andere effecten.

Toetsing schade

Voor wat betreft de impact van de onderdoorgang is primair van belang wat de toekomstige trillingsniveaus, in termen van V_{top} , zullen zijn. Bij alle panden voldoet, volgens vergelijking van de twee laatste kolommen in tabel 4, de toetswaarde aan deze grenswaarde.

Toetsing hinder

De Beleidsregel trillinghinder spoor (Bts) toetst in eerste instantie of er door wijziging aan het spoor er een toename kan optreden van trillingen. Daar is, volgens tabel 4, op geen enkel adres sprake van. Zowel V_{max} als V_{per} gaan significant, waarschijnlijk merkbaar, omlaag. De onzekerheid over deze afnames is klein (sigma's van minder dan 10%).

Trillingen zullen overigens wel voelbaar blijven in deze woonbuurt ($V_{max} > 0,1$).

7. Conclusies

De komst van de spooronderdoorgang heeft wat betreft trillingen met grote waarschijnlijkheid geen nadelige effecten op de bestaande bebouwing. De trillingsniveaus gaan waarschijnlijk zelfs merkbaar omlaag.

Toetsing van het aspect schade, volgens SBR richtlijn A, levert geen overschrijdingen van grenswaarden. De kans op schade is kleiner dan 1%.

Toetsing van het aspect hinder, volgens de Beleidsregel trillinghinder spoor (Bts), leidt niet tot het ontwerpen van maatregelen.

Referenties

- [1] Koopman, A.: *QuickScan Spoorkruising N631 Rijen – Trillingen in de omgeving vanwege treinpassages*, Level A&V rapport LA.200606.R01, 28 juni 2020
- [2] Koopman, A, Sorrentino, A.: *Trillingsmeting Spoorkruising N631 Rijen – nulsituatie*, Level A&V rapport LA.200606.R02, 7 december 2020
- [3] 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
- [4] SBR trillingsrichtlijn A : Schade aan bouwwerken : 2017 https://www.crow.nl/downloads/pdf/kennisbank/2019/sbr_trillingsrichtlijn_deel_a_2017.aspx
- [5] SBR trillingsrichtlijn B : Hinder voor personen in gebouwen : 2002 <https://www.crow.nl/online-kennis-tools/kennismodule-funderingen-en-trillingen>
- [6] SBR trillingsrichtlijn C : Verstoring van apparatuur : 2002 <https://www.crow.nl/online-kennis-tools/kennismodule-funderingen-en-trillingen>
- [7] *Beleidsregel trillingshinder spoor*, Staatscourant 27 maart 2014 <https://wetten.overheid.nl/BWBR0031466/2014-03-27>
- [8] *Gebruik rekenmodel Ours*, RIVM, mei 2020 https://github.com/rivm-syso/OURS/blob/master/Gebruik_OURS_versie1.0.pdf

QuickScan

Spoorkruising N631 Rijen

Trillingen in de omgeving vanwege
treinpassages

Rapportnummer: **LA.200604.R01**

Plaats en datum: **Eindhoven, 28 juni 2020**

Versie:

Opdrachtgever: **Anteagroup**

Uitgevoerd door: **Level Acoustics & Vibration**

Auteur(s): **Arnold Koopman**

E-mail: arnold@koopman.com

Telefoon: **06 52622384**

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.

DOELSTELLING

Deze quickscan betreft de gevolgen van de voorziene spooronderdoorgang in de N631 in Rijen voor trillingen in de omgeving vanwege treinpassages. Op dit moment kruist de N631 de spoorlijn Breda-Tilburg door midden van een gelijkvloerse spoorwegovergang. De vraag is wat de vervanging door een spooronderdoorgang betekent voor het ontstaan en voorplanten van bodemtrillingen die treinen veroorzaken. De quickscan heeft tot doel te bepalen of vervolgonderzoek hiernaar nodig is en zo ja welke vorm dat zou kunnen hebben. Trillingen tijdens de bouwfase vallen buiten de scope.

INHOUD

1. Uitgangspunten
2. Risico's
3. Analyses
4. Conclusies
5. Aanbevelingen

1. Uitgangspunten

Locatie: 51.587046° 4.903901°

Ontvangen documenten

- 442272-FS-0-0101-A1 verl. (0594x1189).pdf
- 442272-S-0-0102, Optimalisatie.pdf
- 453780-DOC-0002_v0.1.pdf
- 453780-DOC-0002_v0.2.pdf
- 453780-DOC-0002_v0.2_DSN AS dek.pdf
- 20200304-435780.100-rap-Geotechnisch onderzoek spoorwegonderdoorgang Oosterhoutseweg te Rijen-R1.0.pdf
- Vooropnames van BouwRisk, projectnr BR196265 (26 woningen, Oosterhoutseweg, Oranjeplein, Pastoor Gillisstraat)

Toetsingskader:

- SBR trillingsrichtlijn A: Schade aan bouwwerken : 2017
- SBR trillingsrichtlijn B: Hinder voor personen in gebouwen : 2002

Hulpmiddelen:

- OURS (uniform rekenmodel spoortrillingen)
- Spoorligger (tool voor het bepalen van spoorligging ivm trillingen)



Mogelijk optredende negatieve effecten:

- A. Treintrillingen nemen door de wijziging naar een onderdoorgang toe.
- B. Toename van trillingen leidt tot toename van hinder
- C. Toename van trillingen leidt tot bouwkundige schade

Ad A):

De huidige constructie is een spoorwegovergang. Mogelijk optredende negatieve effecten:

- De onderdoorgang zorgt voor een verslechtering van de spoorbaan, waardoor meer trillingen ontstaan
- De onderdoorgang geeft trillingen beter door naar de omgeving
- De onderdoorgang kaatst trillingen terug naar de omgeving

Ad B):

Trillingen die nu nog niet voelbaar zijn kunnen voelbaar en mogelijk hinderlijk worden. Trillingen die nu al voelbaar zijn kunnen sterker worden en daardoor hinderlijker.

Ad C): Trillingen op de fundering met een bepaalde minimum sterkte kunnen leiden tot een niet verwaarloosbare kans op schade. Een mogelijke toename vanwege de onderdoorgang zou bij sommige woningen kunnen leiden tot een overschrijding van die drempelwaarde.

Verwachte kansen:

Ad A): deze kans wordt in het volgende hoofdstuk behandeld.

Ad B): SBR richtlijn B heeft voor "gewijzigde situaties" criteria. Binnen een straal van 150 meter (zie figuur) is het mogelijk dat de onderste streefwaarde van de SBR B in de huidige situatie wordt overschreden. Bij wijziging, zoals komst van de onderdoorgang, is standstill de streefwaarde. Standstill kan worden geïnterpreteerd als een niet merkbare verhoging van het trillingsniveau, welke in de Beleidsregel Trillinghinder Spoor (Bts) van het ministerie van I&W gelijk is aan een toename van niet meer dan 30%.

Ad C): SBR richtlijn A stelt grenswaarden aan het trillingsniveau. Boven die grenswaarde is de kans op schade meer dan 1%.



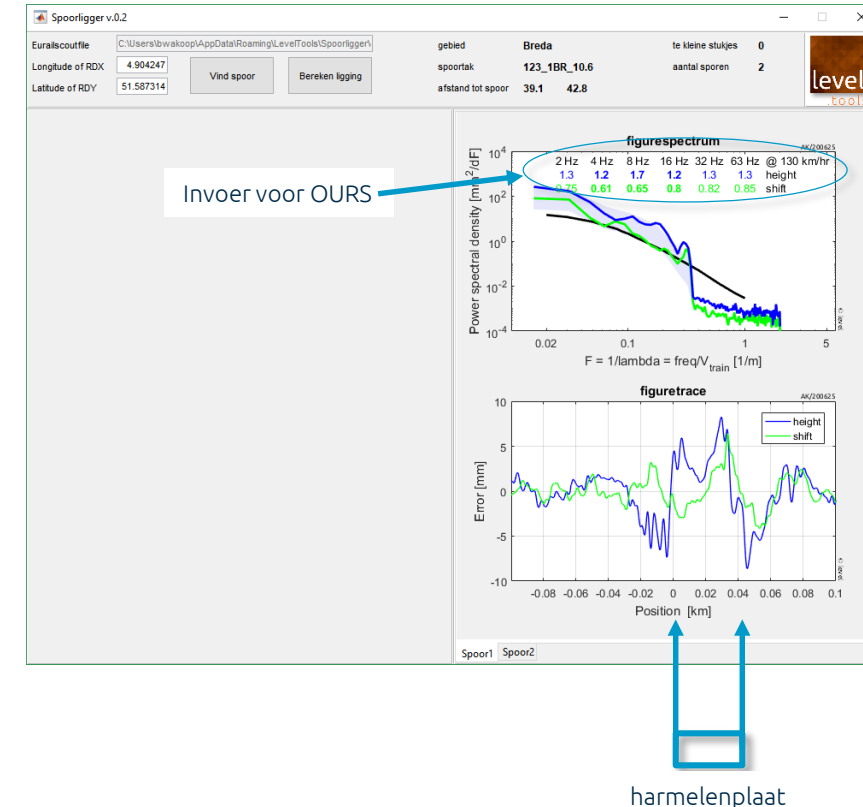
Stap 1: inschatting huidige situatie

- De huidige spoorkwaliteit, welke de mate van trillingsopwekking bepaalt, is niet optimaal. Dit blijkt uit de gegevens van Eurailscout (najaarscampagne 2018), zoals verwerkt met het programma Spoorligger (zie afbeelding). De spoorwegovergang bestaat uit harmelenplaten en daar waar ballastspoor in harmelenplaat overgaat is er sprake van een duidelijke zetting. Deze zettingen leiden tot stootkrachten bij treinpassages en daarmee tot extra trillingen in de omgeving.
- Met OURS (het Nederlandse rekenmodel voor spoortrillingen) is voor vier adressen een berekening gedaan, met de tabelwaardes van Spoorligger als invoer. Gerekend is met een VIRM (140 km/uur) en goederen (erts en container, 90 km/uur). De huidige ICR+ met TRAXX is niet gemodelleerd omdat deze in de toekomstige situatie niet zal passeren. De conservatieve bovengrens (mediaan + 2 sigma) van $V_{\max}$ (hinder) resp. de 1%-rekenwaarde voor V_{top} (schade) zijn:
 - Pastoor Gillesstraat 149, 151: $V_{\max} = 1,0$ en $V_{\text{top,d}} = 1,3$ mm/s (63 Hz)
 - Pastoor Gillesstraat 8: $V_{\max} = 0,4$ en $V_{\text{top,d}} = 0,5$ mm/s (16 Hz)
 - Oosterhoutseweg 55: $V_{\max} = 0,7$ en $V_{\text{top,d}} = 1,0$ mm/s (16 Hz)
 - Nassaulaan 26: $V_{\max} = 0,7$ en $V_{\text{top,d}} = 0,6$ mm/s (16 Hz)

De grenswaarde in verband met schade ($V_{\text{top,r}} = 1,5$ mm/s @16Hz, uitgaande van een trillingsgevoelige bouwkundige staat) ligt boven de berekende waardes, de berekening geeft dus geen aanleiding schade te verwachten.

De streefwaarden in verband met hinder (0,4 in de nacht) worden door de berekende waardes bijna overall overschreden, er is dus aanleiding in de huidige situatie hinder te verwachten.

NB: OURS is nog niet grondig gevalideerd. Het model heeft in deze studie vooral zijn nut om effecten (verschillen) te berekenen. De absolute uitkomsten zijn minder zeker. Er wordt om die reden een 97,5% bovengrens gehanteerd voor de absolute voorspellingen.



Stap 2: inschatting effect onderdoorgang

- Onderdoorgangen kunnen nog niet doorerekend worden met OURS. Er is dus een berekening buiten OURS om nodig.
- De onderdoorgang heeft de volgende drie effecten:
 - a) de huidige zettingen worden weggenomen en er komen geen nieuwe zettingen omdat het spoorviaduct een bovenbouw van ballast heeft
 - b) de wanden van de onderdoorgang reflecteren trillingen waardoor een spiegelbron ontstaat
 - c) de wanden van de onderdoorgang vormen een voortplantingspad dat minder gedempt is

Ad a): Berekening met OURS zonder de tabelwaardes van Spoorligger, dus zonder zettingen, leiden tot een reductie op de 4 adressen van gemiddeld **een factor 1,5**. Dit heeft een onzekerheid. De werkelijk waarde zal ergens tussen de 1 en de 2 liggen.

Ad b): De spiegelbron zorgt maximaal voor een versterking met een factor 1,4 van V_{max} en V_{top} . Dit treedt alleen op voor ontvangpunten dichtbij de onderdoorgang omdat voor de maatgevende sterkste trilling tijdens een passage bron en spiegelbron ongeveer tegelijk moeten aankomen wil er sprake zijn van versterking. Om geometrische redenen zal alleen Pastoor Gillesstraat 8 hier mogelijk mee te maken krijgen. **De factor van 1,4** zal in de praktijk waarschijnlijk minder zijn bijv. omdat de wand een beperkte diepte heeft.

Ad c): Trillingen die in de buurt van een wand ontstaan in de bovenbouw treden de wand in en brengen deze geheel in trilling. De wand straalt deze trillingen weer af naar de bodem. Zowel het intreden als het afstralen heeft een zekere (in-)efficiëntie. Alleen omdat de wand intern een lagere demping en hogere stijfheid heeft dan de omliggende bodem maakt dit een potentieel alternatief pad naar de omgeving. In eerste orde kan deze beschreven worden als een puntbron, ter plekke van de kruizing van de baan met de wand, die getransleerd is naar een positie loodrecht tegenover een te onderzoeken pand. Net als voor de spiegelbron geldt daarom dat alleen panden dichtbij een wand van de onderdoorgang dit effect mogelijk zullen ervaren. Om geometrische redenen treft die primair Pastoor Gillesstraat 149 en 151. Hun afstand tot het spoor is 35 meter en afstand tot de wand 25 meter. De versterkingsfactor door de getransleerde puntbron wordt voor deze afstandsverhouding geschat op **1,3**. In de praktijk zal het waarschijnlijk minder zijn omdat verliezen door intrede en afstralen niet zijn verrekend.

Per saldo levert dit op, uitgedrukt in % afname of toename van het trillingsniveau ten opzichte van de huidige situatie:

- Pastoor Gillesstraat 149, 151: 15% afname,
- Pastoor Gillesstraat 8: 10% afname
- Oosterhoutseweg 55: 40% afname
- Nassaulaan 26: 25% afname

Dit zijn verwachtingswaardes. De bandbreedte wordt op 30% geschat. Dat betekent dat er op bijv. Pastoor Gillesstraat 8 ook kans is op een toename tot zo'n 20%. Die treedt dan op omdat de spoorligging na uitvoering niet verbeterd is terwijl de spiegelbron zich ten volle laat gelden.

Voor de overige panden in de omgeving is een afname te verwachten tussen de 0% en 25%.

Op 5 adressen is er een kans dat de huidige trillingsniveaus toenemen door de komst van de onderdoorgang. Toename van die niveaus betekent dat door die komst criteria voor hinder en/of schade worden overschreden. Maatregelen dienen dan te worden overwogen.

De adressen betreffen:

- Pastoor Gillisstraat 151 en 149
- Pastoor Gillisstraat 8
- Oosterhoutseweg 55
- Nassaulaan 26

De kans dat de trillingen juist afnemen is echter groter. Met name bij de laatste twee adressen is de kans op toename vrij klein. Als er al sprake is van toename dan zal deze naar alle waarschijnlijkheid kleiner blijven dan 30%. 30% is de grens voor “merkbare toename” die bijvoorbeeld wordt gehanteerd in de Beleidsregel Trillingshinder Spoor (Bts). Toenames binnen de 30% zijn niet merkbaar en worden daarom als “standstill” geïnterpreteerd.

Gunstig is het wegnemen van de spoorweginvloei, welke nu waarschijnlijk de dominante trillingsbron is. Ongunstig is dat de onderdoorgang als een “spiegel” voor trillingen fungeert en dat de onderdoorgang trillingen met verminderde demping naar de omgeving transporteert. Deze effecten zijn alleen van belang in de directe omgeving van de onderdoorgang.

De kans dat grenswaarden voor schade worden overschreden is zeer klein.

Op een aantal adressen wordt mogelijk de huidige streefwaarde voor hinder ($V_{max}=0,4$) overschreden en stelt de richtlijn (SBR B) dat bij een wijziging als deze gestreefd moet worden het niveau terug te brengen naar 0,4. De Bts daarentegen hanteert voor een situatie als deze de leidraad van stand-still.

Het belangrijkste effect waarop enige kans bestaat is toename van trillingshinder in 5 woningen.

Het ministerie van I&W hanteert een richtbedrag van 47kE/woning voor maatregelen daartegen.

Voor het bestrijden van trillingshinder zijn over het algemeen constructieve ingrepen nodig, hetzij aan de bron hetzij aan het gebouw, en anderszins in de omgeving. De ervaring leert dat bij kleine aantallen woningen alleen ingrepen aan de woningen binnen het budget kunnen passen.

In dit geval zijn ook optimalisaties aan de tunnelbak denkbaar, om de verwachte effecten wat betreft spiegeling en doorgifte te bestrijden.

Of dit alles nodig is hangt wel af van het huidige trillingniveau. Deze is nog onvoldoende bekend.

De volgende stappen kunnen worden ondernomen:

- Keuze voor een toetskader voor hinder: SBR B dan wel Bts.
- Trillingsmetingen aan de Pastoor Gillisstraat 151, ten einde de huidige blootstelling op de 4 locaties te bepalen.
- Op basis hiervan opnieuw toetsen van de toekomstige situatie.
- Indien nodig inventariseren welke maatregelen aan de bak te nemen zijn.
- Bij kleine kans op overschrijding en/of ondoelmatigheid van maatregelen aan de bak, maatregelen aan de woningen inventariseren, wachten tot voltooiing van project en nameting uitvoeren om te bepalen of vervolgstappen nodig zijn.

Trillingsmeting Spoorkruising N631 Rijen nulsituatie



plaats & datum: Eindhoven, 7 december 2020

versie: definitief

opdrachtgever: Anteagroup

auteur(s): Arnold Koopman, Antonio Sorrentino

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. Meetopstelling	5
4. Resultaten	12
Referenties	14

1. Inleiding

In Rijen kruist de provinciale weg N631 de spoorlijn Breda-Tilburg middels een gelijkvloerse spoorwegovergang. Deze spoorwegovergang gaat vervangen worden door een spooronderdoorgang. Er is een "quick scan" uitgevoerd met de vraag welke gevolgen deze vervanging heeft voor trillingen in de omgeving vanwege treinpassages (zie ref [1]). Uit de quick scan kwam onder meer de aanbeveling een trillingsmeting uit te voeren om de nulsituatie met meer nauwkeurigheid vast te stellen. Een dergelijke meting is uitgevoerd en dit rapport vormt de vastlegging ervan.



2. Doel en uitgangspunten

Het onderzoek heeft als doel:

- Vaststellen van de huidige blootstelling aan bodemtrillingen vanwege treinpassages in de omgeving van de spoorwegovergang in de N631 te Rijen.

Uitgangspunten:

- De metingen worden uitgevoerd aan de Pastoor Gillisstraat 151, zoals aanbevolen in de Quick Scan (ref [1]). Deze woning ligt het dichtst bij de spoorwegovergang.
- De meetresultaten worden gebruikt om het model van de Quick Scan te kalibreren. Op die manier wordt de meting vertaald naar de overige panden in de omgeving. Vastlegging hiervan is geen onderdeel van dit rapport.
- De metingen worden uitgevoerd conform de meet- en beoordelingsrichtlijnen van de Stichting Bouwresearch:
 - SBR trillingsrichtlijn A : Schade aan bouwwerken (ref. [2])
 - SBR trillingsrichtlijn B : Hinder voor personen in gebouwen (ref. [3])

Op één aspect wordt afgeweken van de richtlijnen, en wel als het gaat om het bepalen van de beoordelingsmaat V_{max} van richtlijn B. In plaats van paragraaf 9.7 van SBR trillingsrichtlijn B wordt gehanteerd:

- Level memo LA.131001a.M04 (ref. [4]), april 2018

Deze memo legt een bepalingmethode vast voor V_{max} bij treinverkeer die een grotere reproduceerbaarheid heeft dan de methode van de richtlijn. De memo wordt onder andere gebruikt bij toepassing van de *Beleidsregel trillinghinder spoor* (Bts) van de minister van Infrastructuur en Waterstaat (ref. [5]).

3. Meetopstelling

Keuzes

Bij het inrichten van de meetopstelling conform de richtlijnen (zie hoofdstuk 2) zijn er enkele vrije keuzes te maken.

- SBR A: gekozen is voor een “beperkte” meting. Dat betekent dat er een meetpunt is op zowel de fundering als op de hoogste verdieping. Bij de vaker gekozen optie van een “indicatieve” meting wordt alleen op de fundering gemeten, maar in dit geval diende voor de toepassing van SBR B toch al op de hoogste verdieping te worden gemeten. Er is niet gekozen voor een “uitgebreide” meting aangezien dat een optie is die vooral wordt gebruikt indien de kans op overschrijding van de grenswaarden zeer groot is en in meer detail de situatie moet worden onderzocht. Omdat niet “uitgebreid” is gemeten maar “beperkt” worden ter compensatie de gemeten niveaus verzwaaard met een straffactor van 1,4.
- SBR A: het meetpunt “aan de fundering” is niet met een schroefverbinding bevestigd aan de muur maar is op de (betonnen) vloer in de hoek van een ruimte geplaatst.
- SBR B: er is gemeten op vloervelden op de begane grond en op de zolderverdieping (die in gebruik is als kantoor) met precieze posities in overleg met de bewoner.
- SBR B: er was geen sprake van zwevende vloeren of laminaat vloeren, noch was een opslingering van meer dan een factor 5 te verwachten en daarom zijn geen voorlasten toegepast.
- Level memo: er is een meetduur van 1 week gekozen (in plaats van 2 of meer weken) aangezien er voldoende passages van reizigerstreinen en goederentreinen zijn te verwachten om te voldoen aan eisen van de memo daaromtrent.
- Level memo: voor wat betreft het vloerpunt op de begane grond is er gemeten volgens “Optie 2”: een 24-urige meting, synchroon met de meting aan de fundering. De meting op de bovenste verdieping is de volle week doorgezet.

Beschrijving pand

Pastor Gillistraat 151 in Rijen is een vrijstaande woning met twee woonlagen en een bewoonde zolder. Het pand ligt circa 35 meter van het spoor. Tussen de woning en het spoor ligt een tuin. Vanwege de hoge begroeiing in deze tuin is er geen zicht op het spoor en is voor de plaatsing van de webcam, benodigd voor het identificeren van het type trein, uitgeweken naar het nabijgelegen De Vijf Eiken.

De begane grond bestaat uit een woonkamer, een keuken, een garage en een opslagruimte. De garage en de opslagruimte liggen het dichtst bij het spoor. Onder de garage ligt een kelder. De opslagruimte is daarom het meest geschikt geacht voor het zogeheten “fundatiepunt”, het meetpunt aan de fundatie. Op de eerste verdieping zijn slaapkamers en een toilet. Op de zolderverdieping is een studeerkamer ingericht.



Figuur 1, links: aanzicht van de woning vanuit de straat, vanuit het oosten; rechts: woning gezien vanuit de tuin, vanuit het westen

Gebruikte apparatuur

Woning: Pastor Gillistraat 151, 5121CD, Rijen :

- 2x Rion DA21 - Stand alone 4-channel conditioning and acquisition system
- 7x Wilcoxon 731A - Seismic accelerometer

Uitzichtlocatie: "De Vijf Eiken", Oosterhoutseweg 55, 5121 RE Rijen

- Timelapse camera Brinno TLC2000

Meetpunten

Er zijn drie meetpunten in de woning:

- Meetpunt 1: het funderingspunt (3D)
- Meetpunt 2: vloerpunt op de begane grond (1D)
- Meetpunt 3: vloerpunt bovenste verdieping (3D)

NB: "3D" betekent 3 sensoren in 3 verschillende richtingen. "1D" betekent 1 sensor, die alleen verticale trillingen meet

Meetpunt 1:

Begane grond, hoek van de opslagruimte, op de vloer (stampbeton op zand), 3d seismic unit + stand alone acquisition system (dichtst bij het spoor gelegen hoek van het pand)



Figuur 2: meetpunt 1

Meetpunt 2:

Woonkamer, iets uit het midden van de overspanning, 1D seismic unit.
Dit meetpunt heeft alleen de eerste 24 uur meegedraaid.



Figuur 3: meetpunt 2

Meetpunt 3:
Zolder, 3D seismic unit + stand alone acquisition system
Hoogste meetpunt.



Figuur 4: meetpunt 3

Uitzichtlocatie:

Timelapse camera achter het raam op de 1^{ste} verdieping van De Vijf Eiken.



Figuur 5: positie van de op het spoor gerichte camera

Meetomstandigheden

- Het pand ligt op 35 het spoor Breda-Tilburg, een twee sporig traject van ballast op zand. Op 50 meter afstand van het pand is er een spoorwegovergang.
- Er is gemeten in de periode van maandag 14 september 11:30 tot en met maandag 21 september 13:30.
- In die periode was er sprake van regulier en ongehinderd spoorverkeer (zie hoofdstuk 4 voor aantallen en type treinen).
- In en rondom het pand was er geen sprake van bijzonder stoorbronnen (bouwactiviteiten, etc.)
- De bewoners van het pand waren grotendeels thuis. De daarmee gepaard gaande stoortrillingen zijn in de naverwerking verwijderd.

4. Resultaten

In de 7x24 uur zijn 1900 gebeurtenissen geregistreerd en visueel beoordeeld. Ze betroffen:

- 1531 passages van reizigerstreinen, waaronder 463 keer een ICRM+TRAXX
- 173 passages van goederentreinen
- 6 passages van een "losse loc" (locomotief zonder aanhangende wagens)
- 47 gebeurtenissen waarvan de bron onduidelijk is
- 143 gevallen van stoortrillingen

De laatste twee categorieën, bij elkaar 190 events, bevatten geen hoge trillingsniveaus. Dit impliceert dat met de overige 1710 passages een voldoende "schone" dataset beschikbaar is voor de verdere verwerking conform de richtlijnen.

Onderstaande tabel presenteert de resultaten van de verwerking van de 1710 passages. Voor alle meetpunten en voor beide uitwerkmethoden (SBR A en SBR B) zijn de reizigerstreinen dominant.

V_{max} is de beoordelingsgrootte van SBR trillingsrichtlijn B (hinder). SBR B kent ook een V_{per} (een tijdgemiddelde waarde). Deze is hier niet bepaald want niet relevant voor het doel van het onderzoek (zijnde het kalibreren van een trillingsmodel). Overigens is bij spoortrillingen in een situatie als deze (twee-sporig traject) in de SBR B beoordeling V_{max} altijd maatgevend en V_{per} daarom in feite niet relevant.

V_{top} is de beoordelingsgrootte van SBR trillingsrichtlijn A (schade).

Voor het kalibreren van het model is ook van belang wat de dominante trillingsrichtingen zijn volgens de meting en wat de dominante frequentieband is.

De grootte R staat voor "Reproduceerbaarheid" en drukt uit met welke nauwkeurigheid, gegeven de variatie aan treinen, de waarden zijn bepaald. Van R wordt in het algemeen verlangd dat deze kleiner is dan 10%. Hoe groter het aantal treinpassages waaraan gemeten is, hoe beter de reproduceerbaarheid. Het resultaat (3%) laat zien dat in dit geval 1 week meten voldoende is geweest.

Tabel 1: resultaten van de meting

	SBR B			SBR A		
	V _{max} [-]	richting	R	V _{top}	frequentie	richting
Fundatie	0,43	Z	3%	1,17 mm/s	16 Hz	Z
Vloer begane grond	0,69	Z	3%	-	-	-
Hoogste verdieping	0,87	Z	3%	1,47 mm/s	8 Hz	X

Aangezien van het treintype ICRm+TRAXX bekend is dat deze voor hoge trillingsniveaus zorgen en dit type waarschijnlijk in de toekomst om die reden hier niet meer zullen rijden is er ook een uitwerking van de metingen zonder deze treinen. Tabel 2 presenteert de resultaten. Nog steeds geldt dat de reizigerstreinen dominant zijn op alle meetpunten en voor beide richtlijnen. Overigens zijn de verschillen met de goederentreinen nu zeer gering.

Tabel 2: resultaten van de meting waarbij de TRAXX passages zijn verwijderd uit de dataset

	SBR B			SBR A		
	Vmax [-]	richting	R	Vtop	frequentie	richting
Fundatie	0,34	Z	4%	1,17 mm/s	16 Hz	Z
Vloer begane grond	0,59	Z	4%	-	-	-
Hoogste verdieping	0,71	X	4%	1,47 mm/s	8 Hz	X

De resultaten kunnen vergeleken worden met de streefwaarden en grenswaarden van de SBR richtlijn.

Beoordeling van dit specifieke pand was niet het doel van dit onderzoek dus onderstaande vergelijking wordt slechts ter info en zonder verdere toelichting van de toepassing van de richtlijnen gegeven.

SBR A:

Op de fundering is de rekenwaarde voor de grenswaarde voor Vtop voor continue trillingen in een metselwerk pand bij 16 Hz 2,6 mm/s. De rekenwaarde voor de meetwaarde op de fundering is bij deze (beperkte) meting 1,6 mm/s. Het trillingsniveau op de fundering is dus voldoende laag, de kans op schade is kleiner dan 1%. Op de hoogste verdieping is de rekenwaarde voor de grenswaarde voor Vtop voor continue trillingen in een metselwerk pand 6 mm/s. De rekenwaarde voor de meetwaarde op de bovenste verdieping is bij deze (beperkte) meting 2,1 mm/s. Het trillingsniveau op de hoogste verdieping is dus voldoende laag, de kans op schade is kleiner dan 1%.

SBR B:

De bovenste streefwaarde voor Vmax voor herhaald kortdurende trillingen in een bestaande situatie is overdag en 's avonds 0,8 en 's nachts: 0,4. 's Nachts wordt dus niet voldaan aan de streefwaarde. Op de bovenste verdieping overdag ook net niet. Trillingen zijn voelbaar en worden mogelijk als hinderlijk ervaren.

NB:

De gemeten waardes en de toetsuitkomsten zijn representatief voor vergelijkbare panden op vergelijkbare afstand in Nederland.

Referenties

- [1] Koopman, A.: *QuickScan Spoorkruising N631 Rijen – Trillingen in de omgeving vanwege treinpassages*, Level A&V rapport LA.200606.R01, 28 juni 2020
- [2] SBR trillingsrichtlijn A : Schade aan bouwwerken : 2017 https://www.crow.nl/downloads/pdf/kennisbank/2019/sbr_trillingsrichtlijn_deel_a_2017.aspx
- [3] SBR trillingsrichtlijn B : Hinder voor personen in gebouwen : 2002 <https://www.crow.nl/online-kennis-tools/kennismodule-funderingen-en-trillingen>
- [4] *Level memo*, LA.131001a.M04, 13 april 2018 <http://leveltools.nl/files/LA.131001a.M04.42.pdf>
- [5] *Beleidsregel trillingshinder spoor*, Staatscourant 27 maart 2014 <https://wetten.overheid.nl/BWBR0031466/2014-03-27>

Detailberekening Spoorkruising N631 Rijen reflectie en geleiding van trillingen door de onderdoorgang



plaats & datum: Eindhoven, 7 december 2020

versie: definitief

opdrachtgever: Anteagroup

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	5
4. Resultaten	13
5. Conclusies	15
Referenties	16

1. Inleiding

In Rijen kruist de provinciale weg N631 de spoorlijn Breda-Tilburg middels een gelijkvloerse spoorwegovergang. Deze spoorwegovergang gaat vervangen worden door een spooronderdoorgang. Er is een "quick scan" uitgevoerd met de vraag welke gevolgen deze vervanging heeft voor trillingen in de omgeving vanwege treinpassages (zie ref [1]).

De quick scan gaf aanleiding om de situatie in meer detail te bestuderen. In eerste instantie door een trillingsmeting uit te voeren teneinde het gebruikte model te kalibreren en de huidige situatie goed vast te leggen (zie ref [2]). Vervolgens door de effecten van de spoorondergang op bodemtrillingen met een gedetailleerd numeriek model te onderzoeken. Een dergelijk model is gebouwd en geanalyseerd en dit rapport vormt de vastlegging ervan.



2. Doel en uitgangspunten

Het onderzoek heeft als doel:

- 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.

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. Deze stap valt buiten de scope van dit rapport maar is terug te vinden in ref [3].

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.

- 442272-FS-0-0101-A1 verl. (0594x1189).pdf
- 442272-S-0-0102, Optimalisatie.pdf
- 442272-S-1-0102 ontwerp enkelstrooksrotonde.pdf
- 442272-S-1-0103 ontwerp enkelstrooksrotonde.pdf
- 453780-DOC-0002_v0.1.pdf
- 453780-DOC-0002_v0.2.pdf
- 453780-DOC-0002_v0.2_DSN AS dek.pdf
- cf-453780-c-1-xxxx-spoorkruising n631_detached.rvt
- 20200304-435780.100-Geotechnisch onderzoek spoorwegonderdoorgang Oosterhoutseweg te Rijen-R1.0.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.

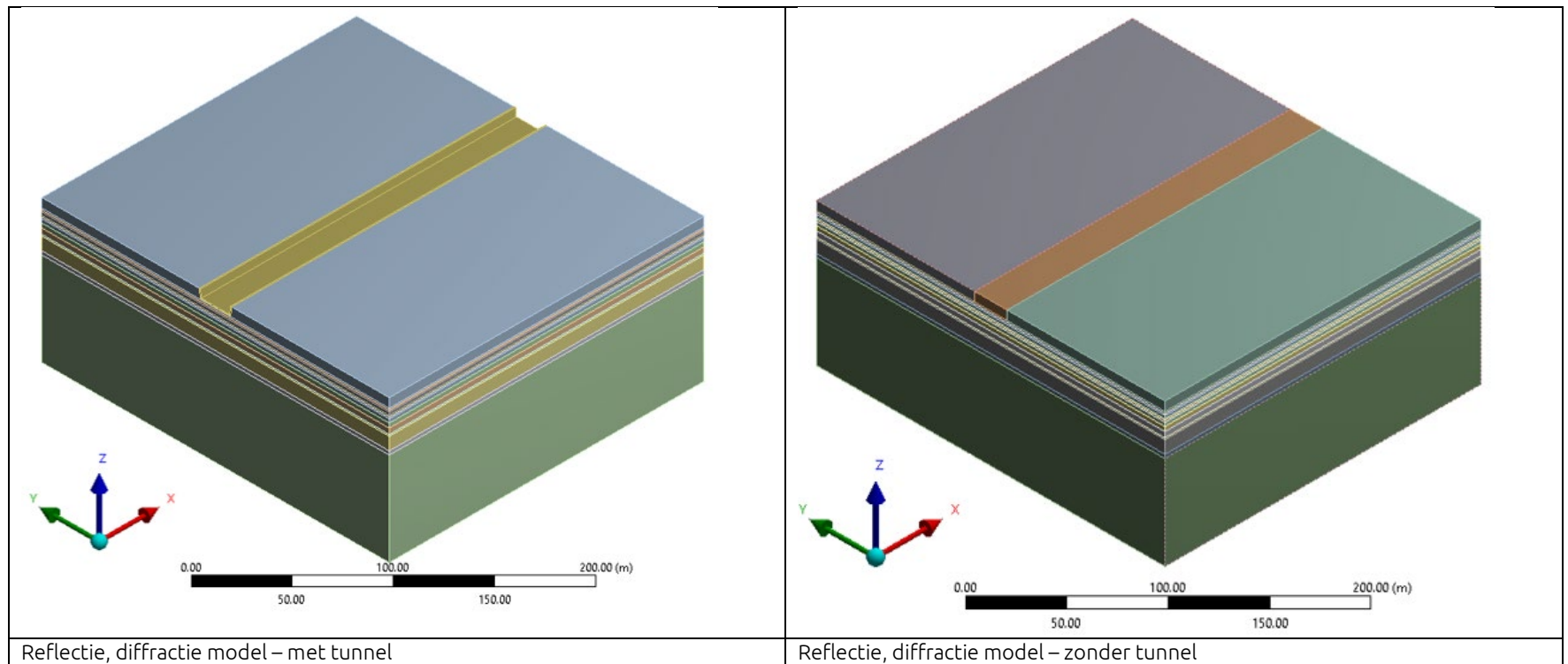
Hoe hoger de frequenties zijn van de trillingen waaraan gerekend dient te worden, hoe korter de daarbij behorende golflengten en diengevolge hoe kleiner de elementen. Er zijn namelijk tenminste 10 elementen per golflengte nodig voor een berekening. Aangezien de rekentijd van een FEM model haast exponentieel 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 de 6 octaafbanden waarmee het overkoepelend model, Ours, werkt. Dat 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 tijdstappen (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.

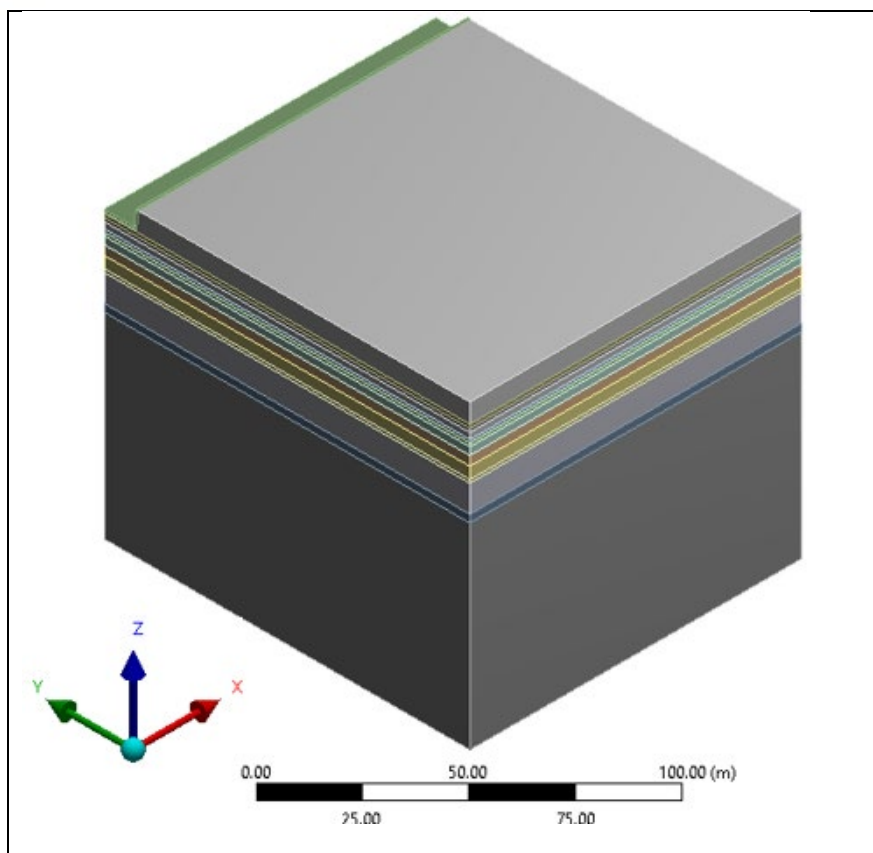
Het model is waar mogelijk voorzien van symmetrie om het model klein te houden: één kant van het spoor en (bij de geleidingssom) en één kant van de onderdoorgang. Om het model verder te optimaliseren in aantal elementen en rekentijd zijn er namelijk twee soorten modellen gemaakt: een model ter bestudering van reflecties en een model ter bestudering van geleiding. Voor de reflecties dient namelijk de bodem aan beide zijden van de onderdoorgang te worden gemodelleerd terwijl voor de geleidingssom de onderdoorgang in volle lengte dient te worden gemodelleerd. Een gezamenlijk model zou heel groot worden, twee aparte modellen kunnen elk kleiner op een eigen manier. Voor een vergelijk met de situatie zonder tunnel is voor elk probleem ook een simulatie gedaan waarbij de tunnel niet in het model zit.

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

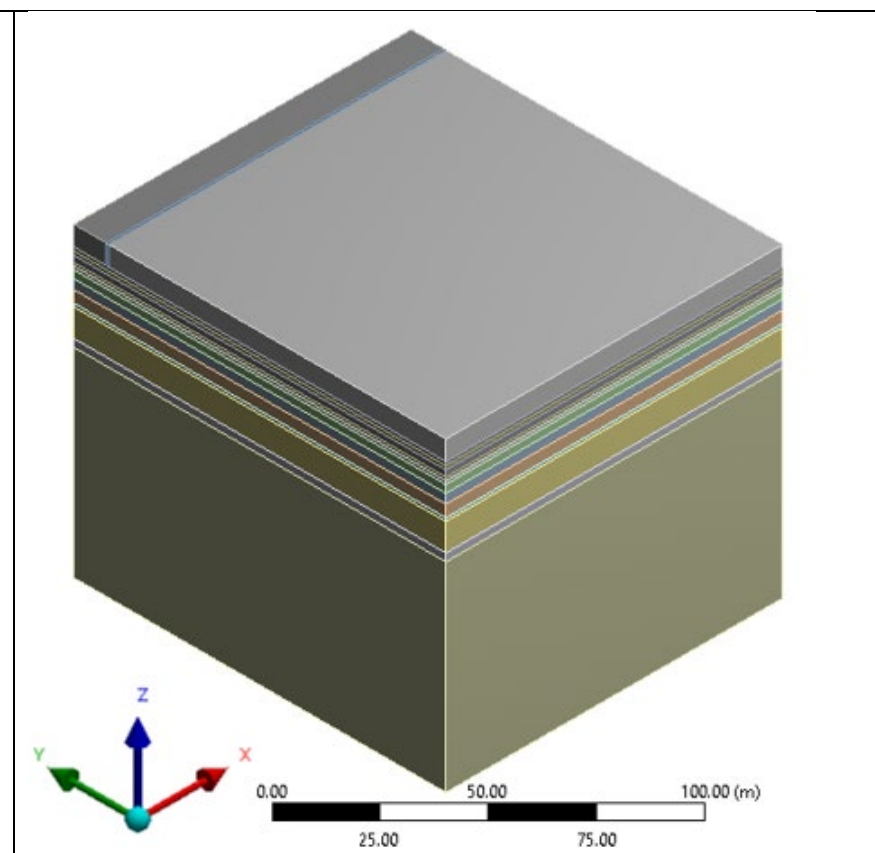
Voor de reflectie/diffractie sommen en geleidingssommen zijn de octaafbanden zoals gegeven in Tabel 1 bestudeerd, zowel met als zonder tunnel. Per octaafband zijn 4 modellen gebouwd (reflectie resp. geleiding, met en zonder onderdoorgang). De 2 Hz octaafband is achterwege gelaten omdat deze frequentieband volgens de Ours sommen in Rijen geen rol van betekenis speelt en omdat de te onderzoeken effecten naar verwachting bij die band nog het geringst zal zijn.

Hieronder staan figuren die de verschillende types modellen laten zien. Hierbij valt op dat de geleidingsmodellen de helft van het reflectie/diffractie model is. Dit komt omdat voor de geleidingsmodellen symmetrie over de hartlijn van de tunnel aangenomen kan worden. Vervolg paragrafen geven gedetailleerde informatie over de gebruikte modellen.





Geleidingsmodel – met tunnel



Geleidingsmodel – zonder tunnel

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.

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
32	22.6	45.3
64	45.3	90.5

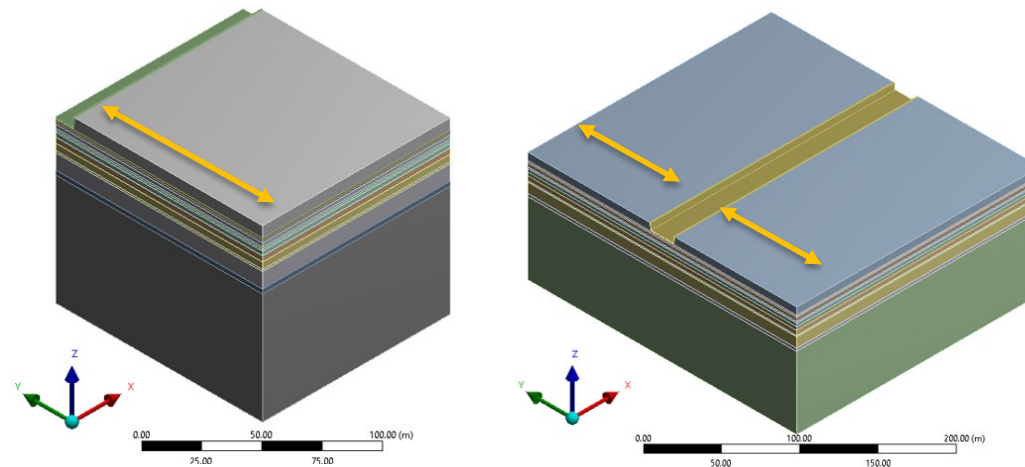
Beschrijving model

Model afmetingen

De afmetingen van het model in het horizontale vlak zijn bepaald door het frequentiegebied waarvoor het model van toepassing is. De gemodelleerde afstand naast de tunnel is afhankelijk van de laagste frequentie in het frequentiegebied waarvoor het model van toepassing is. Er moeten namelijk 2 golven in de gemodelleerde afstand passen. De benodigde afstand is bepaald voor alle 13 gemodelleerde bodemlagen. De maximale benodigde afstand is genomen voor het model.

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

Center frequentie [Hz]	Afstand tot tunnel [m] (y-richting – oranje pijl)
4	220
8	110
16	55
32	28
64	14



Figuur 1: de gele pijlen illustreren de "afstand tot tunnel" zoals bedoeld in tabel 2

De breedte van de modellen zijn afhankelijk van het doel van het model:

- Reflectie / diffractie model: de breedte van het model wordt bepaald door het feit dat een reflectie van minimaal 45 graden bestudeerd wordt. Hierdoor is de breedte van het reflectiemodel gelijk aan 2 keer de afstand naast de tunnel.
- Geleidingsmodel: de breedte van het model is gelijk aan de afstand naast de tunnel, met een minimale breedte gelijk aan de lengte van de onderdoorgang (62 meter)

Diepte van het model:

De diepte van de modellen is bepaald door de bodemdata. De bodemdata is gedefinieerd tot aan 100 meter diep.

Uitzondering hierop zijn de 64Hz reflectie modellen. Deze modellen zijn gemodelleerd tot een diepte van 85 meter, dit omdat het model anders te groot werd om doorgerekend te worden.

Bodemopbouw

De bodemopbouw is bepaald door de bodemmodule van Ours.

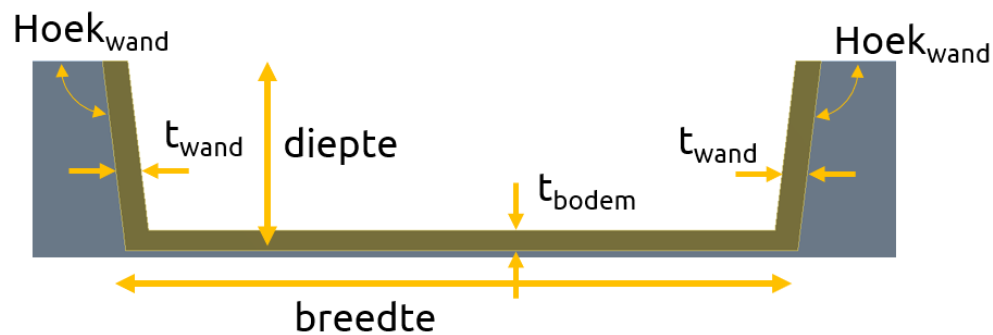
De bodem is opgebouwd uit 13 bodemlagen. De definitie van deze bodemlagen en materiaaleigenschappen zijn gebaseerd op de verschillende sonderingen in de omgeving van de onderdoorgang die beschikbaar zijn de Basisregistratie Ondergrond (BR). De resultaten van verschillende metingen zijn door Ours gecombineerd. De minimale dikte van de bodemlagen is gezet op 1 meter. Zie tabel 4.

Constructie

De onderdoorgang is versimpeld naar een "u-profiel". De onderdoorgang is gemodelleerd over de hele lengte (x-richting) van het model. Daarbij is de diepte van de onderdoorgang over de hele lengte van de onderdoorgang constant gehouden (zijnde de maximale diepte van het model). Dit vereenvoudigt het model en is "conservatief": de te onderzoeken effecten, die leiden tot hogere trillingsniveaus in de omgeving, worden er hoogstens door overschat, niet onderschat.

Tabel 3: geometrie van de onderdoorgang

Diepte	6,0 meter
Breedte	21,2 meter
t_{bodem}	0,65 meter
t_{wand}	0,80 meter
$\text{Hoek}_{\text{wand}}$	97 graden

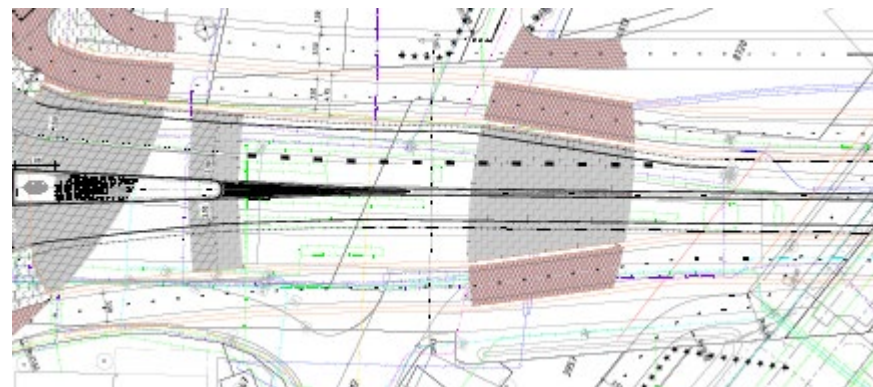


Figuur 2: parametrisering van de onderdoorgang

De afmetingen van het u-profiel zijn gemiddelde waarden, gebaseerd op het beschikbare 3D model (cf-453780-c-1-xxxx-spoorkruising n631_detached.rvt). Zie tabel 3 en figuur 2.

Aan de noordkant loopt de onderdoorgang uit tot 8 meter extra breedte volgens 442272-S-1-0103. Dit heeft een aantal effecten.

- De noordelijke wanden komen dichterbij de bebouwing. Dit speelt met name bij De Vijf Eiken. Dit wordt verwerkt in het overkoepelende model Ours (zie ref [3]) waar de geometrie van de situatie, de locatie van bronnen en panden en de door dit gerapporteerde effecten worden gecombineerd.
- De wanden zijn nu iets gebogen en hebben bovendien twee knikken. Voor de geleiding zal dit nauwelijks een rol spelen. Voor de reflectie betekent het een verandering van de hoek van inval en uitval. Dit wordt verwerkt, middels de spiegelbronmethode, in het overkoepelende model.



Figuur 3: verbreding van de onderdoorgang aan de noordkant (uit: 442272-S-1-010)

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. Tabel 4 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.

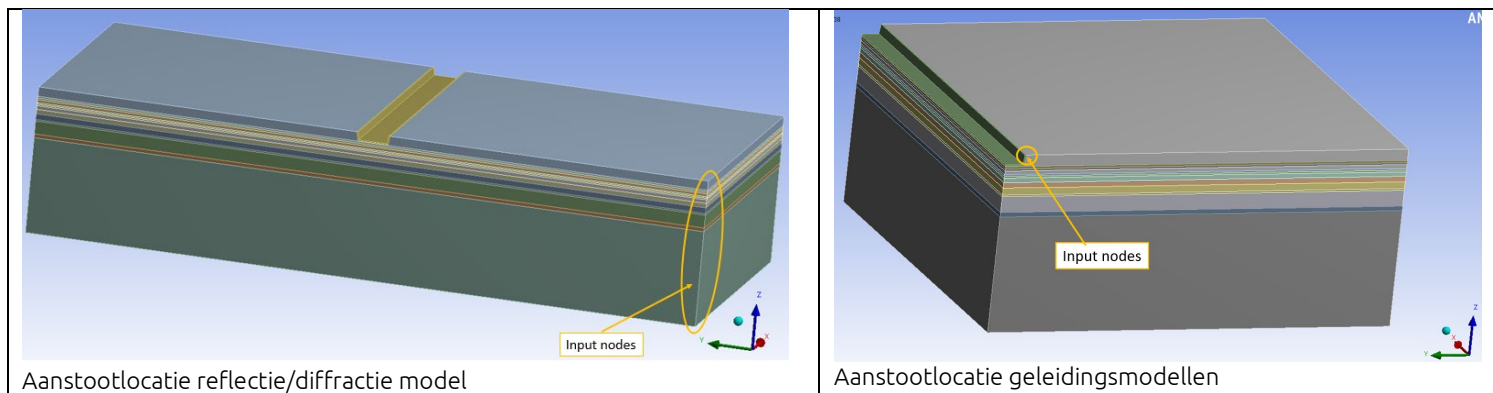
- Vlak -x: symmetrie randvoorwaarde
- Vlak +x: oneindigheidsrandvoorwaarde
- Vlak -y: oneindigheidsrandvoorwaarde
- Vlak +y: oneindigheidsrandvoorwaarde
- Vlak -z: vast

Tabel 4: invoergegevens van de materialen van de bodem en van de onderdoorgang

	Diepte		Elasticiteit	Dichtheid	Poisson's Ratio	Damping
	van [m]	tot [m]	[Pa]	[kg/m ³]	[-]	[%]
Bodem	0,0	6,4	1,9E+08	1981	0,30	1,1
	6,4	7,6	2,4E+08	1975	0,49	1,0
	7,6	8,8	2,6E+08	1983	0,49	1,0
	8,8	10,8	2,9E+08	2002	0,49	0,9
	10,8	11,8	2,8E+08	1967	0,49	1,0
	11,8	12,9	3,0E+08	2004	0,49	0,9
	12,9	15,4	3,3E+08	2005	0,49	0,9
	15,4	18,5	3,5E+08	2024	0,49	0,9
	18,5	22,3	4,5E+08	2052	0,49	0,9
	22,3	23,4	5,0E+08	2029	0,49	0,9
	23,4	32,3	5,9E+08	2092	0,49	0,9
	32,3	34,8	5,7E+08	2074	0,49	0,8
Onderdoorgang	-	-	3,0E+10	2300	0,18	0.0

Aanstootposities

Een krachtaanstoting is voor beide modellen gebruikt. De kracht heeft de vorm van een halve sinus met de impuls tijd gelijk aan $1/(\text{center frequentie} * 2)$. De positie van de aanstootkracht is voor beide modellen aangegeven in figuur 4. Voor de modellen zonder tunnel is de kracht op exact dezelfde positie ingeleid op de bodem. 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 onder een hoek van 45 graden in y-z vlak.



Figuur 4: locatie van de excitatie (krachtaanstoting) van elk van de twee typen modellen

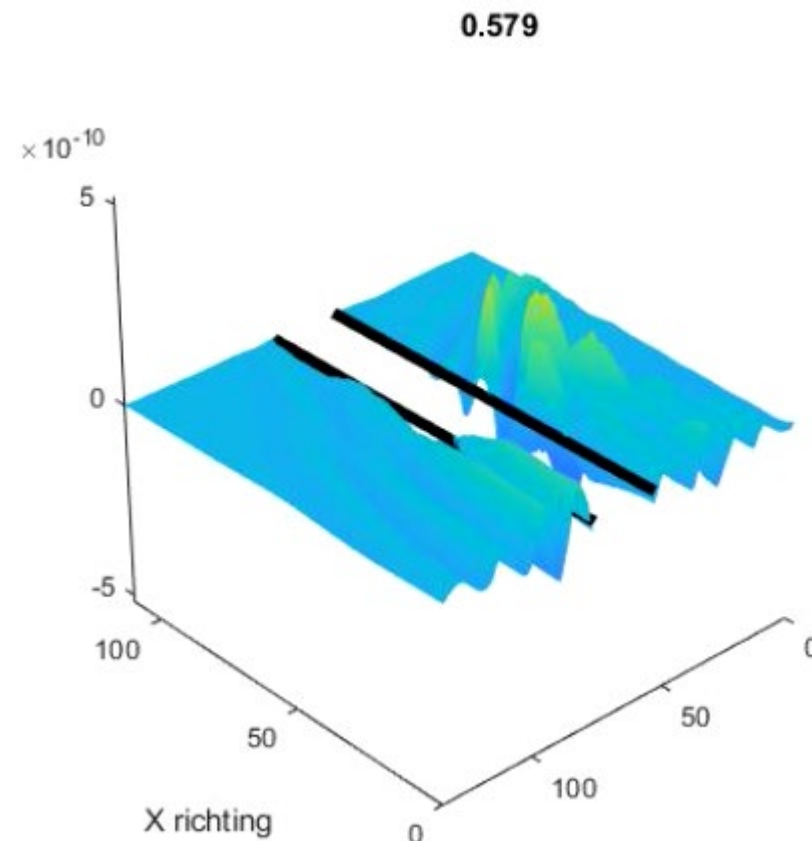
4. Resultaten

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 de hoek van 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



Figuur 5: verticale verplaatsing van het maaiveld, 0,579 seconde na excitatie in de oorsprong; dit is het reflectiemodel, de tunnelbak is in de naverwerking achterwege gelaten

afgestraald naar de omringende bodem. Al deze effecten worden verrekend in dit model.

In tabel 5 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 geometrische aspecten van de voortplanting in rekening te worden gebracht. Bij reflectie wordt daarvoor de spiegelbron methode gebruikt, waarbij de percentages uit tabel 5 de sterkte van de spiegelbron bepalen. Bij geleiding gelden vergelijkbare geometrische regels.

In tabel 5 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 (scherpende 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 5: grootte van de twee effecten, per frequentieband, uitgedrukt in percentage van de energie die extra in de omgeving terecht komt

	4 Hz	8 Hz	16 Hz	32 Hz	63 Hz
Reflectie	0%	35%	70%	90%	90%
Geleiding	0%	0%	0%	0%	0%

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. Conclusies

De spooronderdoorgang is geen geleider van trillingen.

De spooronderdoorgang reflecteert bodemtrillingen in de 8 Hz octaafband en hoger. Bij 8 Hz is de reflectie-efficiëntie 35%, bij 16 Hz 70% en bij 32 Hz en hoger 90%.

Referenties

- [1] Koopman, A.: *QuickScan Spoorkruising N631 Rijen – Trillingen in de omgeving vanwege treinpassages*, Level A&V rapport LA.200606.R01, 28 juni 2020
- [2] Koopman, A, Sorrentino, A.: *Trillingsmeting Spoorkruising N631 Rijen – nulsituatie*, Level A&V rapport LA.200606.R02, 7 december 2020
- [3] Koopman, A: *Spoorkruising N631 Rijen – Trillingen in de omgeving vanwege treinpassages*, Level A&V rapport LA.200606.R04, 7 december 2020