

# Trillingsmetingen in geboorde tunnels en ondergrond tijdens proefrijden RandstadRail te Rotterdam



Figuur 1 – Statenwegtracé in Rotterdam (D. Sellenraad; Aeroview).

## Inleiding

RandstadRail is een lightrail verbinding tussen Rotterdam, Den Haag en Zoetermeer. Met deze verbinding is het mogelijk om, zonder over te stappen, te reizen tussen de centra van Rotterdam en Den Haag. Binnen de Stadsregio Rotterdam heeft het Ingenieursbureau Gemeentewerken Rotterdam (IGWR) het ontwerp (architectonisch en technisch), de contractering, het projectmanagement en de directievoering tijdens de aanleg verzorgd. Onderdeel van RandstadRail in Rotterdam zijn twee geboorde tunnels, het zogenaamde Statenwegtracé, die de voormalige Hofpleinlijn verbindt met het metronet in Rotterdam, zie *figuur 1*. Op 17 augustus 2010 is het Statenwegtracé voor exploitatie in gebruik genomen.

## Trillingen veroorzaakt door metroverkeer

IGWR heeft ruime ervaring opgedaan met door metroverkeer veroorzaakte trillingen in traditioneel gebouwde onderheide metrotunnels en

het effect van deze trillingen op belendende bebouwing. De ervaring is gebaseerd op theoretische beschouwingen, modelonderzoek en metingen bij bestaande metrolijnen in Rotterdam. Voor het ontwerp van de geboorde tunnels van het Statenwegtracé is deze ervaring echter beperkt bruikbaar. Dit vanwege de verschillen in constructie tussen een geboorde tunnel (losse segmenten met geringe wanddikte) en een conventionele tunnel (monoliet met grotere betondimensies).

Verder verschilt de wijze van funderen, 'op staal' in het dichte pleistocene zand bij de geboorde tunnel versus een conventionele tunnel in de slappe holocene klei en veen lagen met palen gefundeerd in het pleistocene zand. Op basis van bovengenoemde verschillen en het ontbreken van ervaring met vergelijkbare tunnelboorprojecten in een vergelijkbare ondergrond is besloten tot het uitvoeren van een modelonderzoek tijdens de ontwerpfase van het project.

**ir. Robert Berkelaar**  
tot 1 mei 2011 Adviseur bij  
Ing.bureau Gemeentewerken  
Rotterdam  
Risicomanager Volker InfraDesign



**ir. Rolf Dalmeijer**  
Constructeur  
Ing.bureau Gemeentewerken  
Rotterdam



**ing. D.Zandbergen**  
Geotechnisch constructeur  
Ing.bureau Gemeentewerken  
Rotterdam



## Modelonderzoek

### OPZET ONDERZOEK

In het modelonderzoek is gebruik gemaakt van twee afzonderlijke rekenmodellen. Het eerste model betreft een serie massa-veer systemen waarbij de voertuigpassage is gesimuleerd. Hiermee is de trillingsoverdracht van voertuig via rail, railstoelen en railopstort naar de tunnelling bepaald. De berekende belasting op de tunnelling is gebruikt als invoer voor het tweede model. Het tweede model betreft een 2D-eindig elementen model van tunnelling, grond en een gebouw gefundeerd op palen. Met de belastingen uit het eerste model zijn in het tweede model de optredende trillingen en het contactgeluid in het gebouw berekend.

### TOETSINGSKADER

De berekende trillingen zijn getoetst aan de streefwaarden die gelden voor herhaald voorkomende trillingen gedurende lange tijd volgens de SBR richtlijn deel B. Het toetsingskader is geldig voor de gehele constructie waarbij de nachtelijke periode maatgevend is. De volgende streefwaarden zijn hierbij gehanteerd: een maximaal trillingsniveau  $A1=0,1$  mm/s of een hoger maximaal trillingsniveau  $A2=0,2$  mm/s gecombineerd met een gemiddeld trillingsniveau  $A3=0,05$  mm/s.

Voor het beoordelen van het contactgeluidniveau is gebruik gemaakt van de beoordelingsmethode die bij het ontwerp van voorgaande metrolijnen in Rotterdam ook is gebruikt. De criteria zijn gebaseerd op (inter)nationale ervaringscijfers en voldoen aan de wet geluidhinder. Ook bij het contactgeluid is de nachtelijke periode maatgevend. Voor de nachtperiode geldt een gemiddeld toelaatbaar geluidniveau in een ruimte van  $L_{\text{equivalent}} = 25$  dB(A). Hierbij is een maximaal passage geluidniveau  $L_{\text{passage}} = 35$  dB(A) toelaatbaar.

## Samenvatting

Tijdens de ontwerpfase van het boortunneltracé van RandstadRail in Rotterdam is modelonderzoek uitgevoerd naar het door metroverkeer veroorzaakte trilling- en contactgeluidniveau. Op basis van dit onderzoek zijn diverse preventieve maatregelen genomen. Bij het zogenaamde SSH-gebouw is plaatselijk een afgeveerde plaat toegepast en over de gehele tunnelengte onder de Statenweg zijn gemodificeerde kurkrubberplaten onder de railstoelen geplaatst. Ondanks de genomen maatregelen was er een restrisico aanwezig dat de trilling- cq. contactgeluid-

niveaus zouden afwijken van wat was voorspeld en tot hinder konden leiden. Om zekerheid te krijgen over de optredende niveaus zijn tijdens het proefbedrijf trillingsmetingen uitgevoerd. De trillingsmeetsensoren, of te wel geophones, zijn geplaatst in de geboorde tunnel, op verschillende niveaus in de ondergrond en aan maaiveld. Tijdens het proefbedrijf zijn op twee locaties metingen uitgevoerd waarbij de snelheid van het metrovoertuig stapsgewijs is opgevoerd. Dit artikel gaat vooral in op de opzet van de metingen en de resultaten van het onderzoek.

## Resultaten modelonderzoek en mitigerende maatregelen

### CONTACTGELUID STATENWEG

De resultaten van het modelonderzoek lieten overschrijdingen zien van het berekende contactgeluidniveau in de panden langs de Statenweg. Bij de toekomstige exploitatiesnelheid van 80 km/u wordt de streefwaarde met 3 dB(A) overschreden. Als gevolg hiervan is besloten reducerende maatregelen toe te passen in de vorm van gemodificeerde kurkrubberplaten over de gehele lengte van het tracé onder de Statenweg. Rekening is gehouden met spreiding in de effectiviteit van de maatregel en daarom is de benodigde reductie met 5 dB(A) verhoogd tot 8 dB(A).

### CONTACTGELUID SSH-GEBOUW

Het SSH-gebouw wijkt bouwkundig sterk af van de gemodelleerde bebouwing op de Statenweg en ligt veel dichterbij de tunnelwand (kortste afstand is ca. 2 m). De resultaten uit het model gaven na extrapolatie lagere waarden ten opzichte van de waarden zoals deze zijn vastgesteld voor conventioneel gebouwde metrotunnels. Zekerheids halve is er voor het SSH-gebouw van de laatste, en dus hogere waarden, uitgegaan. In dat geval wordt de streefwaarde met 13 dB(A) overschreden. Als mitigerende maatregel is een afgeveerde plaat ontworpen met een reductie van 18 dB(A), rekening houdend met spreiding in de effectiviteit van de maatregel.

### TRILLINGEN

Uit de resultaten van de modelberekeningen bleek dat op een afstand van ca. 9 m uit de zijkant van de boortunnel voldaan wordt aan de gestelde eisen voor trillingen. De gevellijn van de bebouwing langs de Statenweg ligt, het SSH-gebouw uitgezonderd, op een afstand van minimaal 10,5 m uit de wand van de boortunnel. Hieruit volgt dat langs de Statenweg voor trillingen geen aanvullende maatregelen noodzakelijk zijn. Met het toepassen van een afgeveerde plaat ter plekke van het SSH-gebouw worden de trillingsniveaus zodanig gereduceerd dat hinder ten gevolge van trillingen ook hier niet te verwachten is.

## RESTRISICO; AANLEIDING TOT UITVOEREN METINGEN

Ondanks de toegepaste maatregelen bestond er een restrisico dat het trilling- cq. contactgeluidniveau in de belendende bebouwing afwijkt van de voorspelde niveaus en tot hinder tijdens de exploitatie van het Statenwegtracé zou kunnen leiden. Om zekerheid te krijgen over de optredende niveaus is besloten tijdens het proefrijden metingen uit te voeren. De metingen beperkten zich in eerste instantie tot trillingsmetingen in de boortunnel, de bodem en aan maaiveld. Als daar

aanleiding toe zou zijn zouden in een later stadium ook metingen (trillingen en contactgeluid) aan en in de belendende bebouwing kunnen worden uitgevoerd.

De metingen zijn in april 2010 uitgevoerd door IGWR. Opdrachtgever van het trillingsonderzoek was de Projectorganisatie RandstadRail.

## Opzet trillingsonderzoek

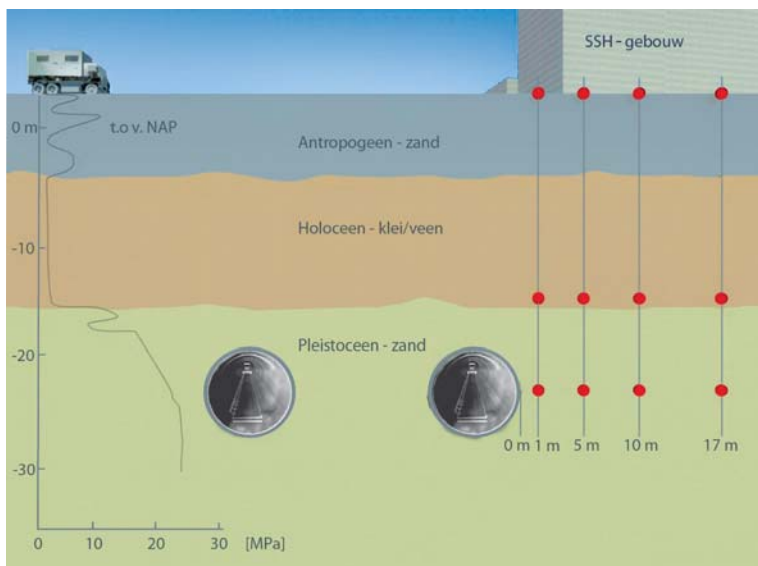
Het onderzoek is op twee locaties langs het Statenwegtracé uitgevoerd. Deze locaties zijn zo



Figuur 2 – Onderzoeklocaties: Statenweg - hoek Gordelweg en SSH-gebouw.

Tabel 1 Details onderzoekslocaties

Locatie	Afstand tot bebouwing	Mitigerende maatregel	Proefrijden in tunnel
Statenweg – hoek Gordelweg	ca. 11 m van oostelijke buis	Gemodificeerde kurkrubberplaten	Spoor 2, westbuis
SSH-gebouw	ca. 2 m van oostelijke buis	Afgeveerde plaat	Spoor 1, oostbuis



**Figuur 3** – Doornede locatie SSH-gebouw met globale grondopbouw en positie sensoren.

gekozen dat de geboorde tunnels op de meetlocaties op de kortste afstand tot de bebouwing liggen, zie *figuur 2* en *tabel 1*.

Op beide locaties ligt de tunnel volledig in het pleistocene zand en is de grondopbouw op hoofdlijnen vergelijkbaar, zie *figuur 3*.

Er is gemeten tijdens het proefrijden van Randstad-Rail. Hierbij is met een voertuig type RSG3 van fabrikant Bombardier Transportation gereden. De voertuigsnelheid is stapsgewijs opgevoerd tot ca. 20 km/u boven de toekomstige baanvak-snelheid van 80 km/u.

Om de trillingsniveaus en trillingsoverdracht vast te stellen zijn trillingsopnemers op de volgende posities geïnstalleerd, zie *figuur 3* en *4*:

- direct aan de baan (S1 en S2 op 2 locaties aan de railopstorten, ca. 30 m van elkaar, mede om de rijnsnelheid en de rijrichting te kunnen bepalen. (de x-richting stond hierbij haaks op het spoor);
- aan de boortunnelling, S3 (zelfde meetrichting als S1 en S2);
- in de ondergrond en op maaiveld op afstanden van 1, 5, 10 en 17 cq. 20 m uit de tunnelling:
  - in het pleistocene zand, op niveau hart tunnel;
  - in de holocene klei, op 1 m boven bovenkant pleistocene zand;
  - op maaiveld.

Op locatie Statenweg - hoek Gordelweg is de sensor op 1 m uit de tunnelling in het pleistocene zand verloren gegaan tijdens het aanbrengen. De sensor op 5 m uit de tunnelling is het meest nabij gelegen meetpunt in het pleistocene zand op deze locatie. De metingen in de grond en op maaiveld

zijn zoveel mogelijk in een lijn haaks op de boortunnel geplaatst om de demping te kunnen bepalen.

### Sensoren en data acquisitie systeem

#### SENSOREN

Er zijn twee type sensoren gebruikt voor de metingen:

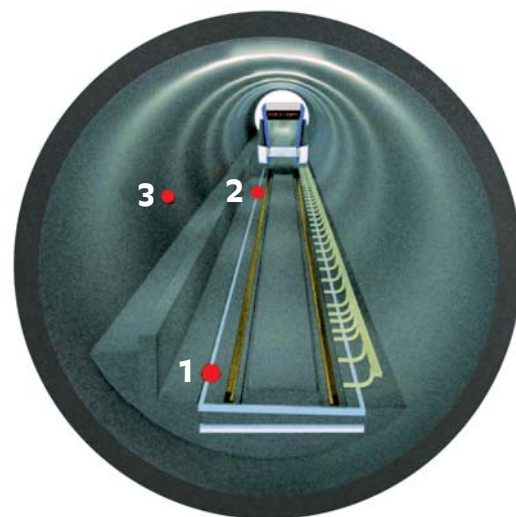
- 7 stuks geophone, ten behoeve van metingen in de boortunnel en op maaiveld;
- 16 stuks geophonecone, ten behoeve van metingen in de ondergrond.

Alle toegepaste sensoren meten trillingen door middel van geofoons in drie onderling loodrechte richtingen, twee in het horizontale vlak en één in het verticale vlak, zie *figuur 5*.

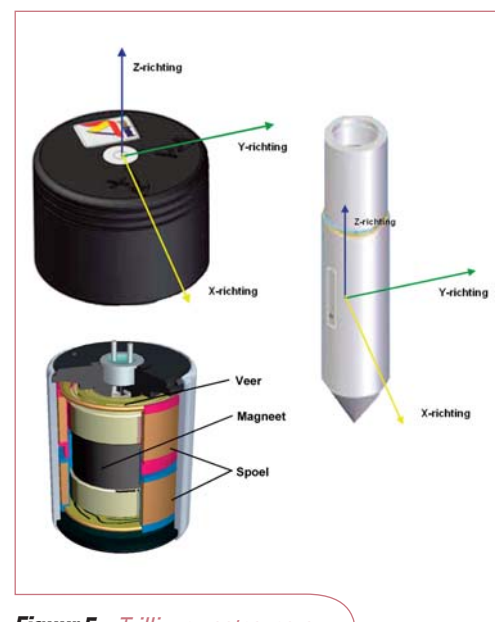
#### Data acquisitie systeem

De sensoren zijn aangesloten op een 'custom made' data acquisitie systeem (DAS). Er zijn twee systemen gebouwd, één voor de sensoren in de tunnel en één voor de sensoren in de ondergrond en op het maaiveld. Een belangrijk uitgangspunt voor het DAS was dat trillingen tot 250 Hz gemeten moeten worden en dat alle kanalen synchroon 'gesampled' worden om faseverschillen in het geregistreerde signaal uit te sluiten.

Het meetsysteem bestaat uit losse meetmodules welke door middel van een netwerk met elkaar verbonden zijn. Om trillingen tot 250 Hz te kunnen registreren dienen alle kanalen met 1000 Hz uitgelezen te worden. Verder heeft ieder kanaal zijn eigen AD-converter om alle kanalen synchroon te kunnen uitlezen. Het systeem voor in de tunnel bevat 9 kanalen (3 sensoren met 3 geofoons). Het



**Figuur 4** – Doornede geboorde tunnel met afgeveerde plaat en positie sensoren S1 t/m S3.



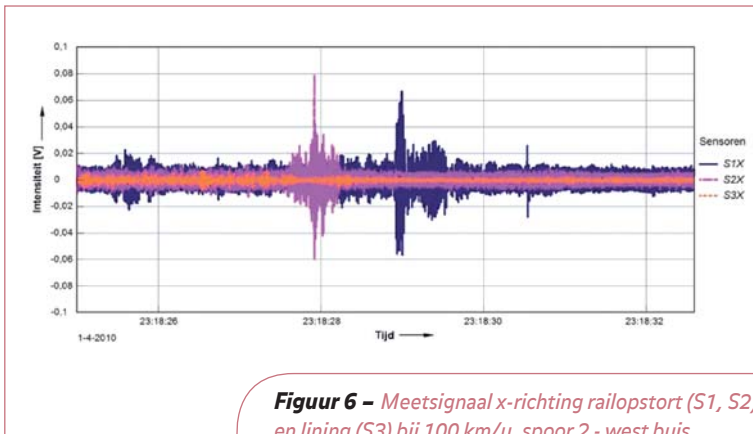
**Figuur 5** – Trillingsmeetsensoren.

systeem buiten de tunnel, voor de sensoren in de grond en op maaiveld, bevat 36 kanalen (12\*3).

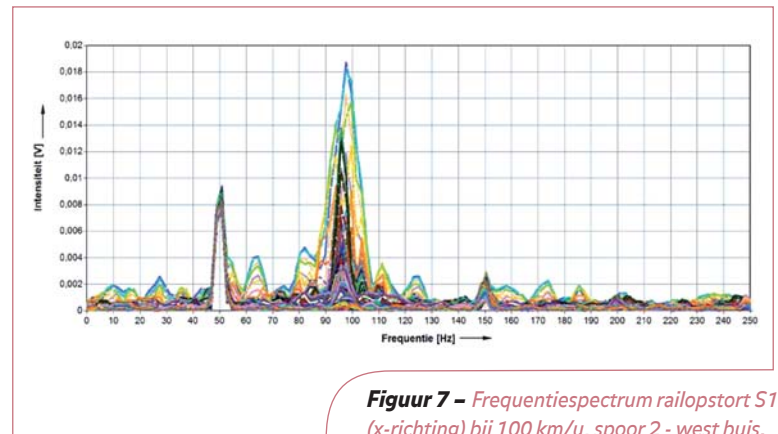
Het meetsysteem is aangesloten op een laptop en geeft de verkregen data real-time weer. Hierbij worden de data continu opgeslagen. De software beschikt over triggermogelijkheden om alleen trillingen boven een bepaald niveau te registreren en zo de hoeveelheid data te beperken.

#### INSTALLATIE ONDERGRONDSE SENSOREN

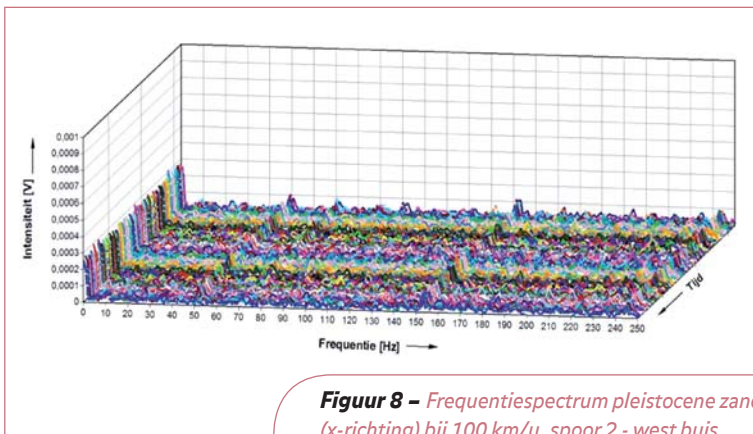
Aankankelijk was voorzien de sensoren met een opzetstuk op een sondeerstang te bevestigen en als 'verloren punt' weg te drukken. Door de x-richting van de sensor haaks op de tunnelbuis te plaatsen was de richting gewaarborgd. De eerste



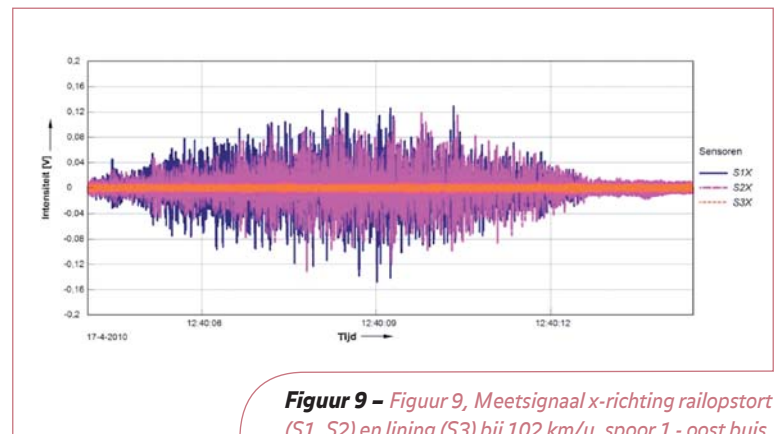
**Figuur 6** – Meetsignaal x-richting railopstort (S1, S2) en lining (S3) bij 100 km/u, spoor 2 - west buis.



**Figuur 7** – Frequentiespectrum railopstort S1 (x-richting) bij 100 km/u, spoor 2 - west buis.



**Figuur 8** – Frequentiespectrum pleistocene zand (x-richting) bij 100 km/u, spoor 2 - west buis.



**Figuur 9** – Meetsignaal x-richting railopstort (S1, S2) en lining (S3) bij 102 km/u, spoor 1 - oost buis.

poging een sensor in de ondergrond aan te brengen leidde echter tot verlies van de sensor. De sterk toenemende conusweerstand in het pleistocene zand op ca. NAP -20 meter en de scheefstand van de sondeerstang hebben mogelijk tot het scheuren van het stalen opzetstuk geleid. De overige sensoren zijn aangebracht door deze op diepte af te hangen in weggedrukte stalen casings met verloren punt. Deze casings zijn aangevuld met zand en vervolgens getrokken waardoor de sensoren omsloten zijn door de grond. Nadeel hierbij is dat de richtingen in het horizontale vlak van de sensoren niet bekend zijn.

## Resultaten

### VERIFICATIE VAN METINGEN

Door de sensoren voor installatie aan te sluiten op het DAS en een testmeting te draaien is aangetoond dat in een gecontroleerde omgeving het systeem, van sensoren tot en met de dataopslag, werkt. Vervolgens zijn de sensoren, na het aanbrengen, met een multimeter doorgemeten om de goede werking te controleren. Aanvullend is de werking van het complete systeem in-situ beproefd door een test waarbij een puls via een aangebrachte sondeerstang in de ondergrond is gebracht. Hieruit bleek dat relatief kleine pulsen

(bescheiden tik met hamer) tegen de sondeerstang duidelijk door de sensoren in de ondergrond werden geregistreerd.

### OMREKENING MEETSIGNAAL NAAR SNELHEID

De output van de sensoren geven de meetwaarden weer in Volt. Met behulp van de specifieke calibratiefactor van de sensor is dit om te rekenen naar mm/s. Gemiddeld bedraagt de calibratiefactor van de toegepaste sensoren 23,0 Vs/m.

$$\frac{\text{Meetwaarden [V]}}{\text{Calibratiefactor [Vs/m]}} = \text{Trillingsnelheid [m/s]}$$

### MEETRESULTATEN

Buiten de verwachting om is uit analyse van de meetsignalen gebleken dat de trillingen in het horizontaal vlak, binnen de tunnel in de x-richting, maatgevend zijn en niet de verwachte z-richting.

### LOCATIE 1 - STATENWEG - HOEK GORDELWEG

Het verkregen meetsignaal is in volt uitgezet tegen de tijd. Door middel van de sensoren aan de railopstorten is de door RandstadRail doorgegeven rijsnelheid geverifieerd. Uit het meetsignaal blijkt dat de rijsnelheid 100 km/u te zijn, zie *figuur 6*. Door toepassing van een Fourieranalyse is het meetsignaal in verschillende frequentiecompo-

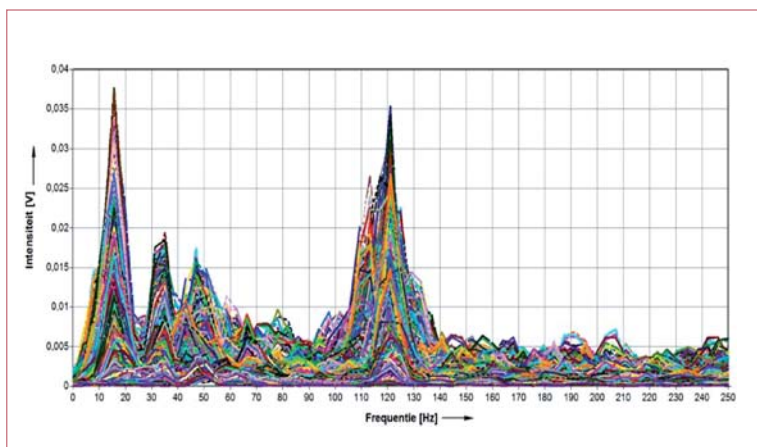
nenten ontbonden, zodat de trillingsintensiteit over het frequentiebereik kan worden bepaald, zie *figuur 7*.

De voertuigpassage bevindt zich in het frequentiegebied van 97 Hertz met een maximale intensiteit van 0,02 Volt, wat overeen komt met 0,79 mm/s. Het continue aanwezige signaal op 50 Hz betreft een stoorsignaal afkomstig van de in de tunnel aanwezige 220 V. Deze meetruis geeft tevens een boventoon op de 100 en 150 Hz. Na afronding van het project is een aarding ingebouwd bij het DAS om het 50 Hz (stoor)signaal uit te sluiten. Ten tijde van het project was dit niet mogelijk.

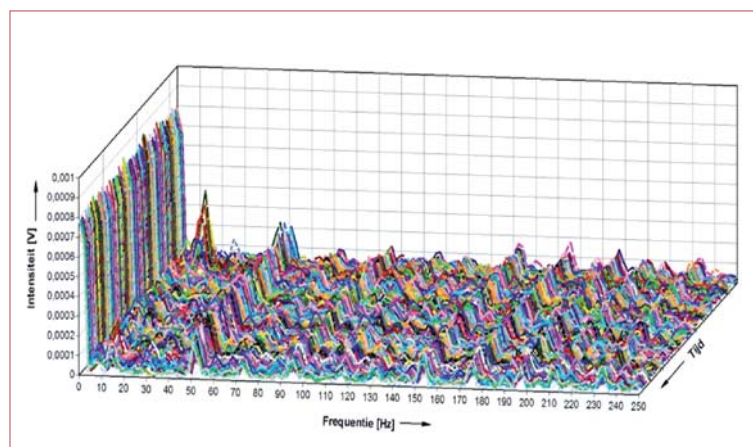
In de ondergrond, naast de tunnel in het pleistocene zand en hoger in de holocene kleilagen, zijn op deze locatie geen trillingen waargenomen (meetlocatie op 5 m afstand uit de tunnel i.v.m. verloren sensor op 1 m uit de tunnel) als gevolg van de voertuigpassage, zie *figuur 8*. Op 1 m uit de tunnel zijn in de holocene kleilagen wel trillingen waargenomen van 0,21 mm/s.

### LOCATIE 2 - SSH-GEBOUW

Ter plekke van het SSH-gebouw was de passagesnelheid 102 km/u. In *figuur 9* is duidelijk te zien dat het meetsignaal afwijkt van het meetsignaal hoek Statenvweg - Gordelweg. De invloed van de



**Figuur 10** – Frequentiespectrum railopstort S1 (x-richting) bij 102 km/u, spoor 1 - oost buis.



**Figuur 11** – Frequentiespectrum pleistocene zand (x-richting) bij 102 km/u, spoor 1 - oost buis.

ter plekke aanwezige afgeveerde plaat is hier de oorzaak.

Een voertuigpassage van 102 km/u over de afgeveerde plaat geeft op de railopstort, dus op de afgeveerde plaat, een respons in zowel het hoge als het lage frequentiegebied. Op 120 Hz bevinden zich trillingen met een maximale intensiteit van 0,04 Volt, dat overeenkomt met 1,50 mm/s. Bij 15 Hz is de trillingssnelheid 1,58 mm/s, zie figuur 10. 15 Hz is de eigenfrequentie van de afgeveerde plaat.

Bij 15 Hz wordt buiten de tunnel 0,17 mm/s in het pleistocene zand gemeten. Deze trilling is tevens in de holocene kleilagen (0,16 mm/s) en aan maaiveld (0,130 mm/s) aanwezig. Op 120 Hz is in de ondergrond niets gemeten, zie figuur 11.

## Meetresultaten

### STATENWEG - HOEK GORDELWEG

Op de testlocatie Statenweg - hoek Gordelweg, waar de gemodificeerde kurkrubberplaten zijn toegepast, is in de tunnel bij ca. 97 Hz de maatgevende trillingsintensiteit gemeten. In de naast en hoger gelegen grondlagen worden geen trillingen waargenomen. De reden hiervan is dat de combinatie van tunnelling en grond als een zeer effectief low-pass filter werkt (alleen lage frequenties worden doorgelaten). De eigenfrequentie van de grond is immers zeer veel lager (<20 Hz) dan het bronsgaalaal. Met andere woorden; het samenspel van baan (inclusief mitigerende maatregel), tunnel en ondergrond is zodanig dat alle hoogfrequente trillingen worden gedempt.

### SSH-GEBOUW

Op de testlocatie SSH-gebouw, waar een afgeveerde plaat aanwezig is, zijn in de door het metroverkeer gegenereerde trillingen aan de railopstort (op de afgeveerde plaat) niet alleen hoge (100 tot

120 Hz) maar ook lage frequenties (15 tot 33 Hz) gemeten. De trillingen zijn ook in de lining gemeten en, in zeer gedempte vorm (demping orde factor 9), ook in het naast de tunnel gelegen grondpakket. Door de eigenfrequentie van de afgeveerde plaat (ca. 15 Hz) is voor de lage frequenties enige versterking van de trillingsintensiteiten te verwachten. Deze versterking blijkt ook uit de meting.

In het pleistocene zand is een maximale trillingssnelheid van 0,17 mm/s bij 15 Hz gemeten. Deze maximale trillingssnelheid is lager dan de streefwaarde A2 (0,2 mm/s) en de gemiddelde trillingssnelheid  $V_{per} = 0,04$  mm/s is lager dan streefwaarde A3 (0,05 mm/s). Mocht deze trillingssnelheid in de bebouwing optreden, dus als verdere demping of opslingering niet wordt meegenomen, dan wordt voldaan aan de toetsing conform SBR richtlijn deel B. Voor contactgeluid geldt dat bij de gemeten frequentie van 15 Hz het verwachte contactgeluidniveau voldoende laag is. Hierdoor is hinder ten gevolge van deze trillingen niet te verwachten. Op basis van deze resultaten zijn geen trillingsmetingen uitgevoerd aan de bebouwing zelf. Het effect van trillingsoverdracht naar de panden en gebouwonderdelen is dan ook niet nader beschouwd.

### Validatie modelonderzoek

Het primaire doel van het trillingsonderzoek was te onderzoeken of het restrisico met betrekking tot contactgeluid en trillingshinder gereduceerd kon worden. Pas na het uitvoeren van de metingen is validatie van het modelonderzoek beschouwd. Hierdoor was het niet meer mogelijk het meetprotocol aan te passen. Verder bleek het maken van een goede terugkoppeling tussen de metingen en het modelonderzoek zeer lastig vanwege de vele verschillen tussen de werkelijkheid, de opzet van de metingen en de uitgangspunten

behorende bij het modelonderzoek. De belangrijkste verschillen zijn:

### MEETLOCATIE

Er zijn geen trillingsmetingen uitgevoerd aan de bebouwing. Het effect van trillingsoverdracht naar de panden en gebouwonderdelen zit dus niet in de gemeten trillingen.

### VOERTUIGTYPE

Tijdens het ontwerp is uitgegaan van het bestaande metromaterieel. Op het Statenwegtracé wordt gereden met een nieuw type voertuig. Verondersteld wordt dat nieuw materieel minder trillingen veroorzaakt.

### VOERTUIGWIELEN - BAAN

In de prognose is uitgegaan van gemiddelde wielen railruwheid. In nieuw staat zijn de wielen nog mooi rond, de rails nog glad en genereren deze daardoor minder trillingen.

### Conclusies en aanbevelingen

Gesteld wordt dat, gezien de huidige omstandigheden en toegepaste maatregelen, er geen hinder met betrekking tot trillingen en contactgeluid wordt verwacht in de belendingen naast het boortunneltracé. Om deze reden is verder onderzoek met trillingsmetingen aan de panden dan ook niet ingezet. Op basis van de meetresultaten en de bijhorende conclusies is het eerder genoemde restrisico komen te vervallen.

Door de opzet van de metingen en de grote verschillen tussen het modelonderzoek en de praktijkmetingen is een validatie van de gebruikte modellen helaas niet mogelijk gebleken. Aanbevolen wordt om in de toekomst bij vergelijkbare onderzoeken cq. metingen het onderzoeksprogramma, waar mogelijk, zodanig in te richten dat de metingen ook gebruikt kunnen worden ter validatie van het uitgevoerde modelonderzoek. ●