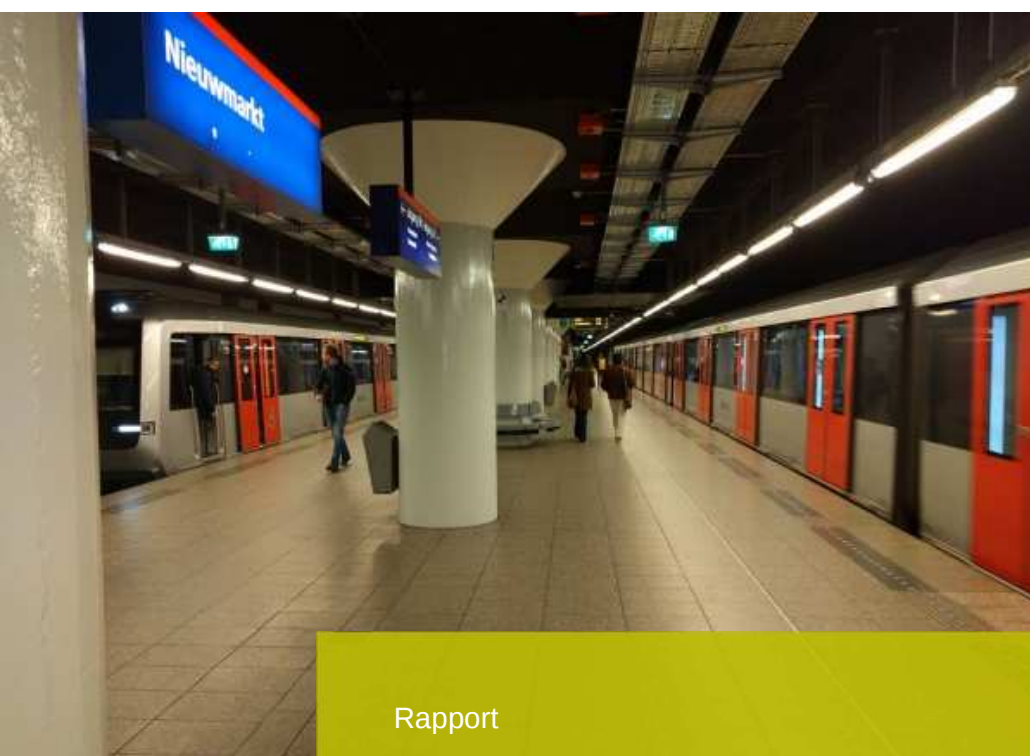




M+P | MBBM groep
Mensen met oplossingen



Rapport

Trillingsproblematiek oostlijn in Amsterdam

Colofon

Opdrachtnemer M+P raadgevende ingenieurs BV

Opdrachtgever Gemeente Amsterdam, Dienst Metro

Opdrachtnummer -

Titel Trillingsproblematiek oostlijn in Amsterdam

Rapportnummer M+P.GADM.18.02.1

Revisie 2

Datum 12 maart 2019

Aantal pagina's 25

Auteurs
ir. Edwin Nieuwenhuizen
ir. Wout Schwanen

Contactpersoon ir. Edwin Nieuwenhuizen | 0297-320651 | aalsmeer@mp.nl

M+P
Visserstraat 50 | 1431 GJ Aalsmeer
Wolfskamerweg 47 | 5262 ES Vught

www.mp.nl | onderdeel van de Müller-BBM groep | Lid NLingenieurs | ISO 9001 gecertificeerd

Copyright © M+P raadgevende ingenieurs BV | Niets van deze rapportage mag worden gebruikt voor andere doeleinden dan is overeengekomen tussen de opdrachtgever en M+P (DNR 2011 Artikel 46).

Inhoud

1	Inleiding	4
1.1	Achtergrond	4
1.2	Huidig onderzoek	5
1.3	Leeswijzer	5
2	Opwekking van geluid en trillingen	6
2.1	Overzicht en terminologie	6
2.2	Model	7
3	Situatie spoortunnel oostlijn	11
3.1	Aanpassingen aan de baan	11
3.2	Veranderingen van inzet van materieel	12
4	Conclusies voorgaande meetcampagnes	15
5	Mogelijke oorzaken van toename trillingen	19
5.1	Inleiding	19
5.2	Breedbandig stootgeluid	19
5.3	Frequentiepiek in de 80 Hz 1/3 octaafband	20
5.4	Demping en stijfheid van de bovenbouw	23
5.5	Hypothese	23
6	Meetprogramma	24
7	Literatuur	25

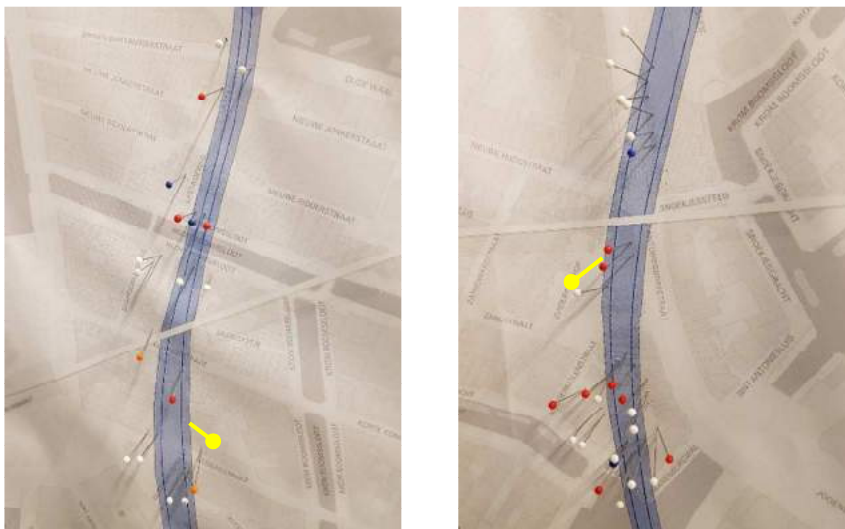
1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Sinds eind 2012 klaagt een deel van de bewoners van de Nieuwmarktbuurt in Amsterdam over toenemend laagfrequent geluid van de ondergrondse metrolijn, de oostlijn. De klachten komen uit de omgeving van het station Nieuwmarkt. Om tot een oplossing van het probleem te komen, is vanaf 2013 door verschillende partijen onderzoek verricht. Naar aanleiding van deze onderzoeken zijn geluids- en trillingsreducerende maatregelen getroffen. Zo is aan de bronzijde getracht om de overgangen bij ES lassen te verbeteren en is het spoor geslepen. In het Pentagongebouw zijn maatregelen getroffen om de transmissie van trillingen te beperken. Hierbij zijn contactbruggen (bestrating tegen de gevel en slechte trillingsdempers) verbroken. De genoemde bron- en overdrachtsmaatregelen hebben niet geleid tot het volledig oplossen van de overlast.

Vanaf eind 2017 heeft de ombudsman onderzoek gedaan naar de overlast die wordt ondervonden [1]. Het onderzoek heeft betrekking op alle adressen die boven of in de directe nabijheid van de tunnel zijn gesitueerd. Aan de bewoners van deze adressen is gevraagd om de overlast nauwkeurig te registreren. Uit het onderzoek is gebleken dat de hinder zich concentreert rond het Pentagongebouw (zie figuur 1). Hier wordt op acht adressen zeer regelmatig overlast ervaren. Deze hotspot bevindt zich nabij de zuidelijke toegang van station Nieuwmarkt. Een tweede gebied waar geregeld hinder wordt ondervonden is de Rechtboomsloot, gelegen nabij de noordelijke toegang van station Nieuwmarkt. Hier geven bewoners van vier adressen aan regelmatig overlast te ervaren. Op andere locaties boven de tunnel zijn helemaal geen klachten geregistreerd.

betekenis spelden
rood= zeer veel overlast
oranje= veel overlast
blauw= af toe ervaring van geluid/trilling; geen overlast
wit= geen enkele ervaring van geluid/trilling
geel= meetpunt trillingen



figuur 1 locaties van geregistreerde klachten bij Nieuwmarkt noord (links) en Nieuwmarkt zuid

Na ingebruikname van de metrolijn in 1980 zijn diverse geluids- en trillingsmetingen verricht. Noemenswaardig zijn de trillingsmetingen die op de caissons nabij de noordelijke en de zuidelijke toegang van het station Nieuwmarkt zijn uitgevoerd. Deze meetpunten liggen in de twee bovengenoemde probleemgebieden. De meetposities zijn in figuur 1 ingetekend. Op deze posities hebben wij de metingen in 2014 (en 2018) herhaald en vergeleken met de waarden uit het verleden. Uit het meetonderzoek is gebleken dat het trillingsniveau bij de noordelijke toegang vergelijkbaar is met de situatie in 1980. Dat geldt echter niet voor het punt nabij de zuidelijke toegang. Daar is het trillingsniveau circa 10 dB hoger dan in het verleden en ook 10 dB hoger dan bij Nieuwmarkt noord. Op die locatie, die overeenkomt met de klachten 'hotspot' Pentagon, is de excitatie door spoorwegmaterieel dus duidelijk toegenomen ten opzichte van de situatie in 1980.

1.2 Huidig onderzoek

Het is niet uitgesloten dat het trillingsprobleem meerdere oorzaken kent. Het huidig onderzoek is echter alleen gericht op het vaststellen van mogelijke oorzaken van de toegenomen trillingsniveaus in de tunnelwand bij Nieuwmarkt zuid. Er worden dus uitsluitend gekeken naar oorzaken die kunnen worden toegeschreven aan de bron en niet aan de overdracht naar de woningen.

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geeft algemene informatie over het ontstaan van spoortrillingen. Hoofdstuk 3 gaat in op de recente wijzigingen aan het spoor en aan het materieel dat gebruik maakt van de tunnel. De problematiek heeft mogelijk een relatie met deze wijzigingen. Hoofdstuk 4 geeft een overzicht van de belangrijkste conclusies die kunnen worden getrokken uit de trillingsmetingen die sinds 2013 in de spoortunnel zijn verricht. In hoofdstuk 5 wordt een overzicht gegeven van mogelijk mechanismen die de toename van de trillingsniveaus bij Nieuwmarkt zuid kunnen verklaren. We strepen de mechanismen af die niet relevant zijn. Dit hoofdstuk wordt afgesloten met een hypothese van de oorzaak van de problematiek. Tot slot doen we in hoofdstuk 6 een voorstel voor een meetcampagne om de hypothese te ondersteunen danwel te verwerpen. Als de precieze toedracht bekend is, kan naar een oplossing worden toegewerkt.

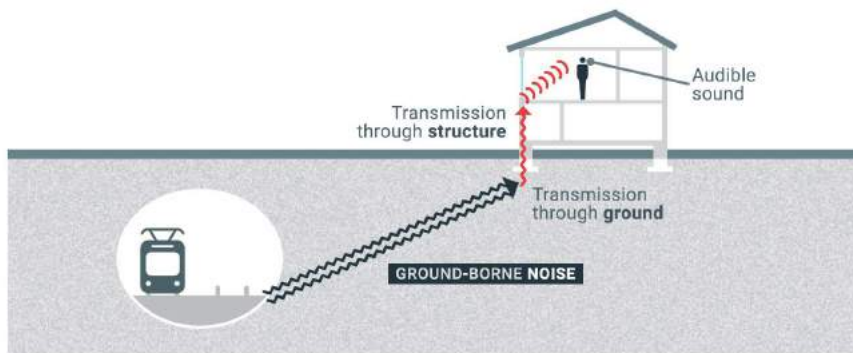
2 Opwekking van geluid en trillingen

2.1 Overzicht en terminologie

Railverkeer veroorzaakt trillingen en geluid die overeenkomsten hebben in de aanstotingsmechanismes, onderliggende mechanische principes en de opwekking van constructiegeluid. Luchtgeluid en trillingen ontstaan door de interactie tussen het spoor en het wiel, verspreiden zich door een medium (lucht/bodem) en kunnen worden waargenomen op een ontvangerpunt.

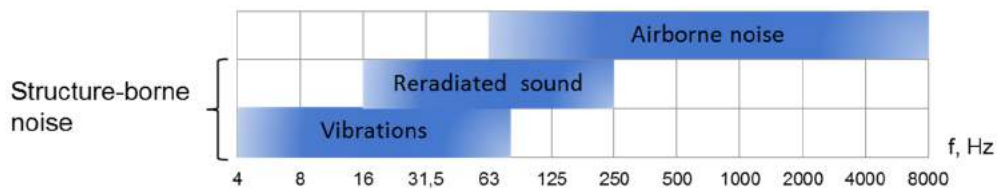
Luchtgeluid ("airborne noise") wordt vooral opgewekt door de ruwheid van het spoor en het wiel en afgestraald door de wielen en het spoor. Luchtgeluid is relevant bij bovengrondse spoorlijnen, maar dat geldt niet bij een ondergrondse spoorlijn.

Trillingen die worden doorgegeven via gebouwen en worden afgestraald door muren en plafonds worden gewoonlijk constructiegeluid genoemd. In figuur 2 wordt de opwekking, overdracht en immissie van constructiegeluid bij een ondergrondse spoorbaan weergegeven.



figuur 2 Emissie, overdracht en immissie van spoortrillingen (bron: RIVAS)

Trillingen worden vooral veroorzaakt door de interactie van dynamische krachten van het railvoertuig met het spoor. De dynamische krachten worden doorgegeven via de bovenbouw (rails, dwarsliggers en ballastbed) aan de onderbouw (tunnelconstructie). Dit veroorzaakt trillingen die zich verspreiden door de bodem. Deze trillingen worden ook overgedragen aan aanliggende gebouwen via hun funderingen. Bij de spoortunnel van de oostlijn staan de woningen deels gefundeerd op de tunnel en is er dus een direct transmissiepad tussen de tunnelwand en de gebouwen daar boven. Om de transmissie van trillingen te beperken, staan deze woningen op rubber blokken afgesteund. Desalniettemin kunnen de trillingen in de gebouwen voelbaar zijn ("vibrations") of hoorbaar doordat ze door vloeren en wanden als geluid worden afgestraald ("reradiated sound"). In figuur 3 zijn de frequentiegebieden weergegeven die horen bij luchtgeluid en constructiegeluid. Bij de spoortunnel in de Nieuwmarktbuurt is sprake van "reradiated sound".

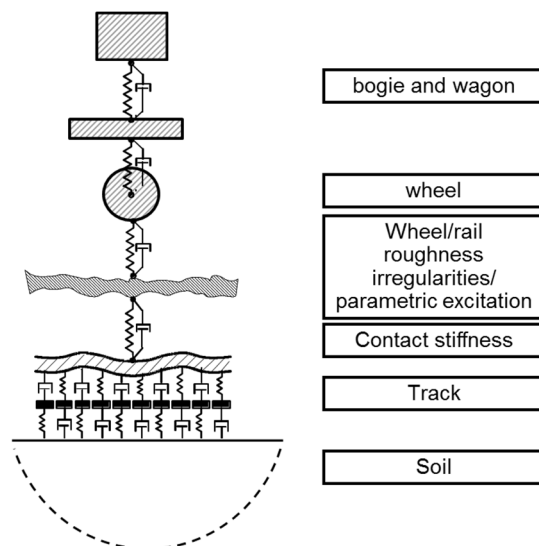


figuur 3 frequentiegebieden van luchtgeluid (airborne noise) en constructiegeluid (structure-borne noise)

2.2 Model

Voor geluid en trillingen geldt hetzelfde mechanisme. Beide worden aangestoten door contact van het wiel met het spoor en verspreiden zich in het voertuig en de onderbouw.

In figuur 4 is het onderliggende mechanische model weergegeven voor de opwekking van railverkeerslawaai en -trillingen.



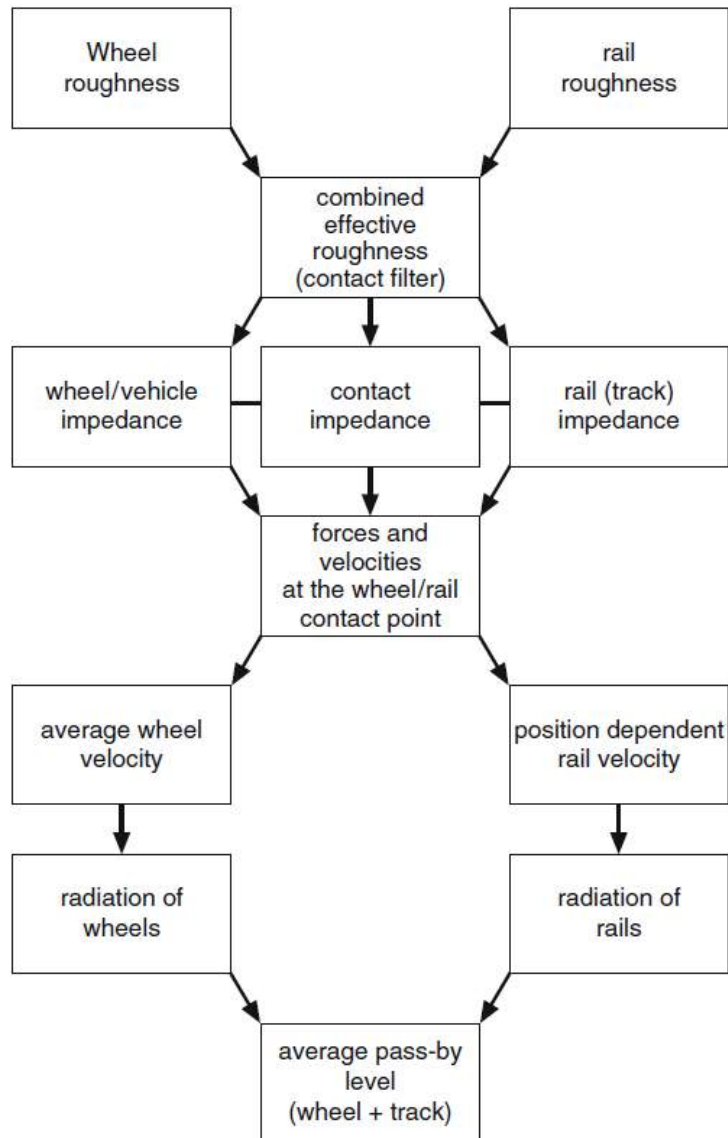
figuur 4 Mechanisch model

De relevante onderdelen van het voertuig zijn het rijtuig, het draai- of truckstel en het wiel. Het gedrag van het spoor wordt bepaald door de componenten ervan: spoorstaaf, onderlegplaat, dwarsligger, ballast en bodem. In het model zijn deze opgenomen als elastische elementen met dempingseffecten. Het contactpunt tussen de spoorstaaf en het wiel kan worden beschreven met de stijfheid van twee lichamen (Hertze contactmodel).

Verskillende aanstotingsmechanismes zijn van toepassing:

- Verplaatsings- of snelheidsexcitatie: onregelmatigheden of ruwheden (afwijkingen van de ideale geometrie) in de wielen en het spoor.
- Parametrische excitatie: lokale variaties in de stijfheid van de spoorstaaf bij het passeren van railopleggingen of door variërende bodemcondities.
- Traagheidsaanstoting: excitatie door onbalans in roterende wielen.

Deze aanstoting veroorzaakt dynamische krachten die trillingen exciteert in het voertuig, het spoor en de bodem. Het mechanisme is weergegeven in figuur 5.



figuur 5 Mechanisme van geluids- en trillingsopwekking

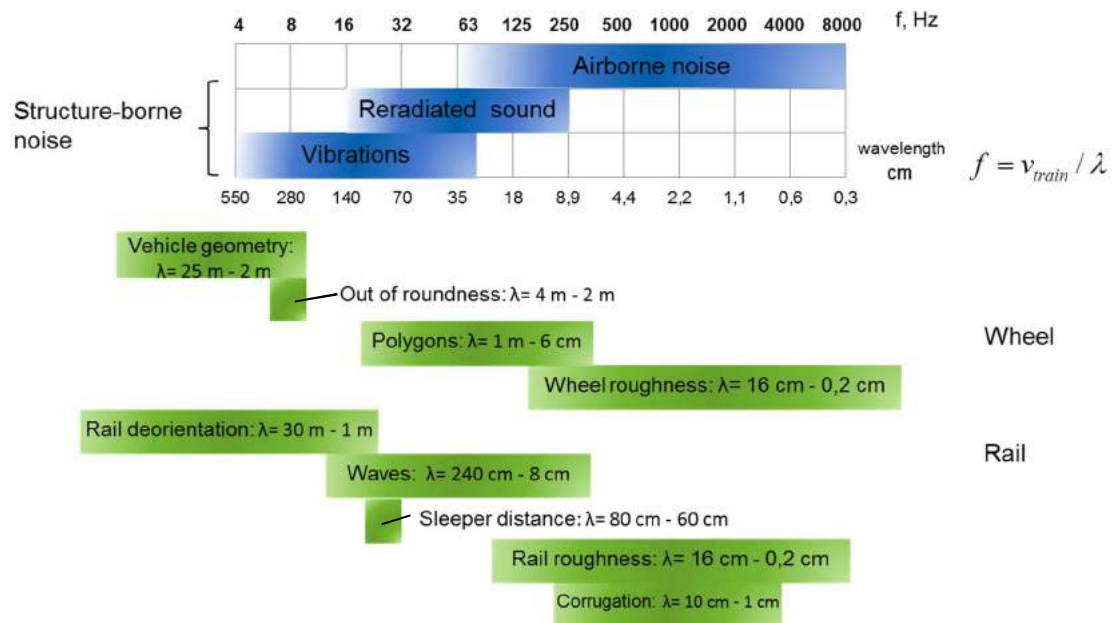
De aanstotingsfrequentie kan afgeleid worden uit de golflengte en de voertuigsnelheid:

$$(1) \quad f = \frac{v_{\text{trein}}}{\lambda}$$

met:

f frequentie in Hz
 v_{trein} snelheid in m/s
 λ golflengte van geometrische regelmatigheid in m (bijvoorbeeld afstand van dwarsliggers of golflengte van golfslijtage)

In figuur 6 worden verschillende rail/wiel-onregelmatigheden genoemd, in combinatie met hun golflengte en de overeenkomende aanstotingsfrequentie bij $v_{train} = 80 \text{ km/h}$.



figuur 6 Verschillende rail/wiel-onregelmatigheden samen met hun golflengte en de corresponderende frequentie bij $v_{train} = 80 \text{ km/h}$



figuur 7 Golfslijtage, wiel met beperkte ruwheid en middelmatige ruwheid (wielruwheidsmetingen met $m|wheel$)

De ruwheid wordt beoordeeld als ruwheidsniveau in derde octaafbanden.

$$L_r = 10 \lg \left(\frac{r_{RMS}^2}{r_0^2} \right)$$

met referentieruwheid: $r_0 = 1 \mu\text{m}$.

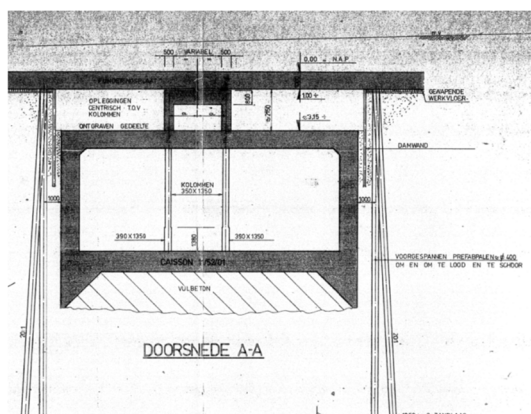
De belangrijkste invloedsfactoren bij railtrillingen zijn:

- **Voertuig:** snelheid, onafgeveerde massa M_w , dynamische voertuigbelasting, regelmatigheid in afstand tussen as of rijtuig, toestand van het wielloopvlak, eigenfrequenties van het rijtuig en het truck/draaistel.
- **Spoor:** type (ballast/slab track), elastische elementen in het spoor, dwarsliggerafstand, onregelmatigheden in het spoor, tunnel, boog of wissel.
- **Bodem:** stijfheid, demping.

3 Situatie spoortunnel oostlijn

3.1 Aanpassingen aan de baan

Het traject Weesperplein-Centraal Station van de Oostlijn werd in 1980 in gebruik genomen. Het traject bevat een 3,5 kilometer lange metrobus onder de Nieuwmarktbuurt. De tunnel is gebouwd met grote betonnen caissons die zijn afgezonken op de zandlaag. De onderstaande figuur geeft een doorsnede van de tunnelsectie onder het Pentagon.



figuur 8 doorsnede van de tunnelsectie onder het Pentagon

In 2007 is de begonnen met de renovatie van de oostlijn en deze is in juli 2013 voltooid. Bij de renovatie is het volgende gewijzigd:

- In 2008 zijn de oorspronkelijke houten dwarsliggers vervangen door betonnen exemplaren. Betonnen dwarsliggers hebben meer massa en absorberen trillingen minder goed dan houten dwarsliggers.
- In een deel van de tunnel zijn oorspronkelijk centricon lagers toegepast. Dit zijn met rubber beklede kogelgewrichten. Uit metingen in 1982 [1] is gebleken dat effect van de centricon lager 13 dB bedraagt. Alle centricon lagers op het traject zijn na 2007 vervangen door een conventioneel railopleggingssysteem. Uit tekening "Baanvak Nieuwmarkt Waterlooplein Ct 606.pdf" blijkt dat de centricon lagers vanaf caisson 11-52-03 in zuidelijke richting zijn aangebracht. Dit betekent dat de lagers vroeger ongeveer bij de zuidgevel van het Pentagon gebouw begonnen. Het grootste deel van het traject onder het Pentagon gebouw was dus niet voorzien van centricon lagers. Het toepassen van een conventioneel railopleggingssysteem op het gehele traject kan daarom niet de oorzaak zijn van de trillingsproblematiek.
- Bij de renovatie is op sommige plekken de onderlaag van het ballastbed blijven liggen. Door veroudering kan deze laag zijn ingeklonken, waardoor deze stijver is dan een nieuwe laag ballast. Indien dit het geval is, is de ballast minder in staat om dynamische krachten op te vangen. Volgens betrokkenen was de onderlaag echter nog in goede staat.
- Het spoor is in 2008 recht gelegd met behulp van een stopmachine.
- In de tunnelsectie onder de schouwburg zijn matten aangebracht onder het ballastbed. Dit is waarschijnlijk gedaan als alternatief voor de centricon lagers. In sectie onder de Nieuwmarktbuurt is deze maatregel niet getroffen.
- In 2012 is het spoor geslepen. In juni 2013 heeft het spoor een veegbeurt gekregen, waarbij alle plekken die in de vorige slijpbeurt onvoldoende zijn geslepen, alsnog zijn aangepakt.

- In verband met tunnelveiligheid zijn in 2012 nieuwe klepregisters aangebracht in de luchtkanalen van metrostation Nieuwmarkt. Dit kan geen invloed hebben op de trillingen in de tunnelwand, tenzij er contactbruggen zijn ontstaan. Dit lijkt niet het geval.
- Bij de aanleg van de Oostlijn in Amsterdam zijn maatregelen getroffen om een aantal metrostations in geval van een atoomaanval ook bruikbaar te maken als schuilkelders. Station Nieuwmarkt was één van de drie stations die deze functie hebben gekregen. De schuilkelders bestonden uit de ruimtes van de stations zelf. Bij de ingangen van de stationshal en bij de perrons bevinden zich grote stalen branddeuren, waarmee de ruimte hermetisch kon worden afgesloten. De stations hebben de functie als schuilkelder in 2004 verloren. Vanaf 2008 zijn de luchtvoorzieningsinstallaties ontmanteld. De ruimtes worden nu gebruikt voor nieuwe moderne luchtinstallaties voor de metrolijn. De branddeuren zijn in 2008 vastgelast. De drempel van de deuren hebben eerder voor problemen gezorgd [4] en zijn waarschijnlijk blijven zitten. Volgens sommige betrokkenen zijn de drempels echter weggebroken.
- Ten zuiden van station Nieuwmarkt bevinden zich ES lassen in beide sporen. Dergelijke lassen waren ook voor de renovatie op die locatie aanwezig (zie de tekening "Baanvak Nieuwmarkt Waterlooplein Ct 605.pdf"). Het is echter niet duidelijk waarom de ES lassen in het verleden niet, en nu dus mogelijk wel tot problemen leiden. Na 2014 zijn maatregelen uitgevoerd aan deze ES lassen. In eerste instantie zijn ze glad geslepen. Later is besloten om ze te vervangen. Het is echter mogelijk dat niet de juiste ES las is aangepakt. De komende jaren zal het tunnelbeveiligingssysteem worden gemoderniseerd. De ES lassen zullen dan verdwijnen.



figuur 9 *spooroplegging (situatie 2013)*

3.2 Veranderingen van inzet van materieel

Deze paragraaf bevat informatie over de materieeltypen die gebruik maken en maakten van de spoortunnel.

Sneltram S1/S2

Het sneltrammaterieel S1/S2 rijdt op lijn 51 naar Amstelveen. Het materieel is begin jaren negentig in dienst gekomen en zal in de toekomst worden vervangen door de serie M7. De trams zijn samengesteld uit twee wagenbakken en hebben een maximale rijsnelheid van 70 km/uur.

Sneltram S3/M4

De serie S3/M4 is geleverd in 1996-1997. De stellen bestaande uit twee wagenbakken, die op twee gewone en een jacobsdraaistel liggen. Alleen de deelserie S3 kan op de metrolijn worden ingezet. In het verleden werden ze sporadisch ingezet op de oostlijn, maar, sinds de afvoer van M2/3 wordt dit materieel weer dagelijks ingezet.

Metro M2/M3

De metro's van de serie M2/M3 zijn vanaf de beginfase in dienst. In 1973 zijn vier M1's gebouwd, maar deze zijn later omgebouwd tot M3. Destijds was deze serie het enige type dat door de tunnel reed. De metingen uit 1980 hebben dus betrekking op dit type. Zij zijn oorspronkelijk bedoeld voor de verbinding tussen Centraal Station en Zuidoost (lijnen 53 en 54). Vanaf 2012 is de M1/2/3 gefaseerd vervangen door de M5. Eind 2015 is de laatste metro uit dienst genomen. De samenstelling is 2-delig, de massa 57 ton en de dienstsnelheid 70 km/u.

Metro M5

M5 is gefaseerd ingestroomd:

- vanaf april 2012 zijn 2 M5 metrostellen ingezet voor testritten
- vanaf juni 2013 zijn de 2 M5 metrostellen in exploitatie genomen
- de aflevering van de overige 23 M5 metrostellen heeft plaatsgevonden van mei 2013 t/m Q2 2015.

De klachten zijn dus ontstaan nadat de M5 serie in exploitatie is gekomen. Het zijn zesdelige metrostellen met een totale lengte van 116,2 meter. De samenstelling is: Tc-M1-M2 – M2-M1-Tc. De dienstsnelheid bedraagt 80 km/u.



figuur 10

metro en sneltram linksboven: S1/S2, rechtsboven: S3/M4, linksonder: M2/M3, rechtsonder: M5

De Dienst Metro heeft ons voorzien van constructietekeningen en informatie over de elastische elementen en de massa's van het materieel dat op de oostlijn wordt en werd ingezet. Onderstaande tabel toont een vergelijking tussen de typen.

tabel I relevante eigenschappen van de verschillende railvoertuigen

Info over het draaistel:	S1S2	S3M4	M5
asafstand [m]	1,9	2,1	2
wieldiameter [mm] nieuw/in gebruik	690/630	705/625	840/760
primaire vering [N/m]	1.333.000 (per 2 veren)	1.100.000 (per 2 veren)	1.270.000 (max. per 2 veren)
secundaire vering [N/m]	970.000 (per set, 1 zijde)	411.000 (voor 1 veer)	692.000 (max. voor 1 veer)
onafgeveerde massa [kg]	?	1.527	1.648 (max.)
massa van wielband [kg]	139	159	nvt

Info over de wielen:	S1S2	S3M4	M5
Type	Bochum 54	Bochum 54	Volwiel
Materiaal	B6T	B6T	R9T
Tensile strength	920-1050	920-1050	900-1050

Aanvullende informatie M5:

2.5. MAIN SIZES AND WEIGHTS

- The length of the biggest bogie is 3676 mm and the width is 2890 mm with equipment else 2550 mm
- Wheel base of bogie : 2000 mm
- Height of the bogie related to the top of rail is 942.5 mm
- Motor and Trailer bogie weight :

	PB1	PB2	TB1	TB2
Maximum Weight	6841 kg	6732 kg	4949 kg	4789 kg
Prediction Weight	6773 kg	6666 kg	4900 kg	4741 kg
Over secondary suspension mass	275 kg	275 kg	274 kg	274 kg
Sprung mass over primary suspension	3203 kg	3095 kg	1942 kg	1845 kg
Unsprung mass per wheelset	1648 kg	1648 kg	1342 kg	1311 kg

Het metromaterieel (M5) heeft een hogere onafgeveerde massa dan het trammaterieel (S3/M4) en beschikt bovendien over volwielen in plaats van wielen met axiale dempers.

Verder is de onafgeveerde massa van de loopdraaistellen (1311 kg/1342 kg), die zich aan de voor- en achterzijde van het treinstel bevinden, fors lager dan de onafgeveerde massa van de motordraaistellen (1648 kg).

De onafgeveerde massa van M2/M3 wordt ingeschat op circa 1100 kg.

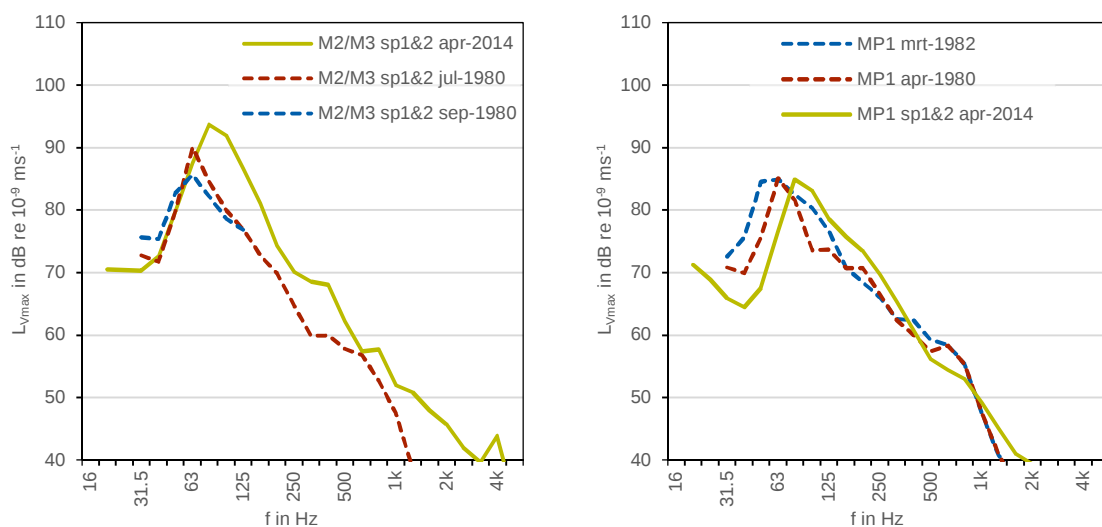
4 Conclusies voorgaande meetcampagnes

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de belangrijkste conclusies die uit onze voorgaande onderzoeken kunnen worden getrokken, zie [2].

Toename van trillingen alleen bij Nieuwmarkt zuid

De trillingsniveaus bij Nieuwmarkt zuid zijn circa 8 dB toegenomen ten opzichte van het begin van de jaren tachtig (figuur 11, links). De piekfrequentie ligt een 1/3 octaafband hoger dan voorheen, namelijk bij 80 Hz in plaats van 63 Hz. Er is sprake van een toename in een groot deel van het frequentiegebied dat van belang is voor constructiegeluid: namelijk van 80 Hz tot 250 Hz.

De trillingsniveaus bij Nieuwmarkt noord zijn daarentegen niet toegenomen ten opzichte van de jaren tachtig (figuur 11, rechts). Echter, ook hier ligt de piek bij een hogere frequentie dan voorheen. In 1980-1982 was de 63 Hz tertsband dominant. Nu is dat, net als bij Nieuwmarkt zuid, de 80 Hz tertsband. De trillingsniveaus zijn bij Nieuwmarkt zuid 10 dB hoger dan bij Nieuwmarkt noord.

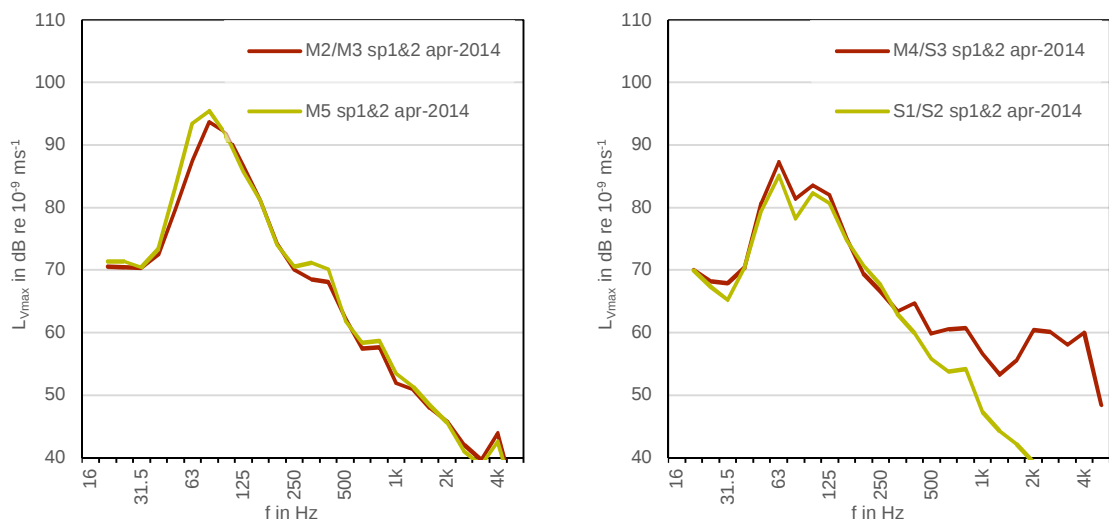


figuur 11

vergelijking met recente meetdata met gegevens na ingebruikname van de tunnel; links toegang noord van station Nieuwmarkt; rechts toegang zuid; de dataset bevat alleen passages van M2/M3, het materieel dat bij de opening van de tunnel in exploitatie was

Metro's M2/M3 en M5 veroorzaken veel sterkere trillingen dan de sneltrams

De trillingsniveaus in de tunnelwand zijn sterk afhankelijk van het voertuigtype. De metro's van de serie M5 veroorzaken vergelijkbare trillingen als die van de serie M2/3 (figuur 12, links). Maar sneltrammaterieel (S1/S2) en de CAF rijklijnen (M4/S3) veroorzaken in het dominante frequentiegebied een 10 tot 15 dB lager trillingsniveau dan de metro's (figuur 12, rechts).

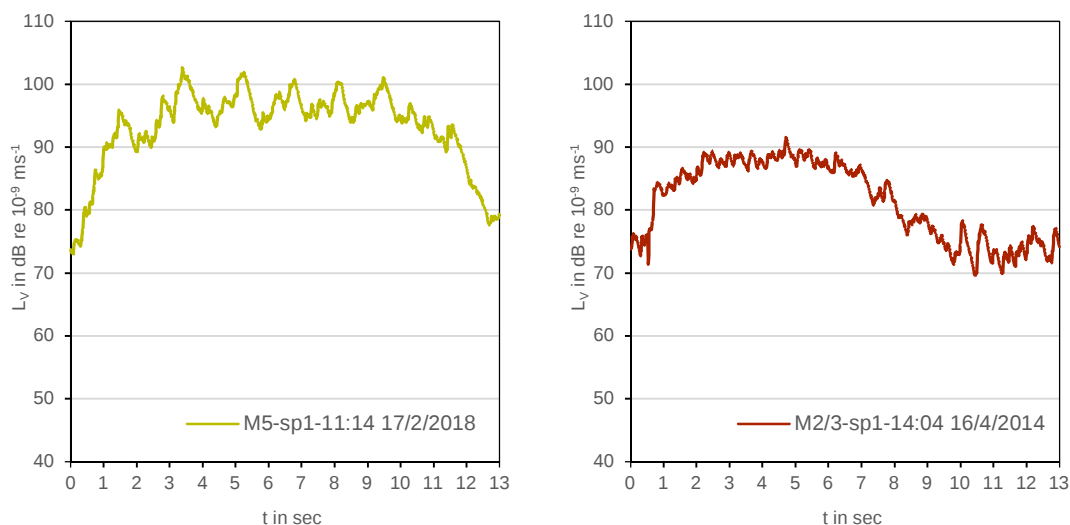


figuur 12 vergelijking van de trillingsniveaus in 1/3 octaafbanden door vier verschillende metrotypes; M2/3 is inmiddels uit dienst genomen

Bij Nieuwmarkt zuid is sprake van stootgeluid

De trillingssignalen van het meetpunt Nieuwmarkt zuid bevatten stootgeluid (figuur 13, links). Bij Nieuwmarkt noord is dat in veel mindere mate het geval (figuur 13, rechts). Dit beeld wordt bevestigd door het onderzoek van de ombudsman. Bij Nieuwmarkt zuid wordt het karakter vooral beschreven met de aanduiding “kedeng-kedeng”. Bij Nieuwmarkt noord wordt gesproken over aanzwellend en uitdovend geluid.

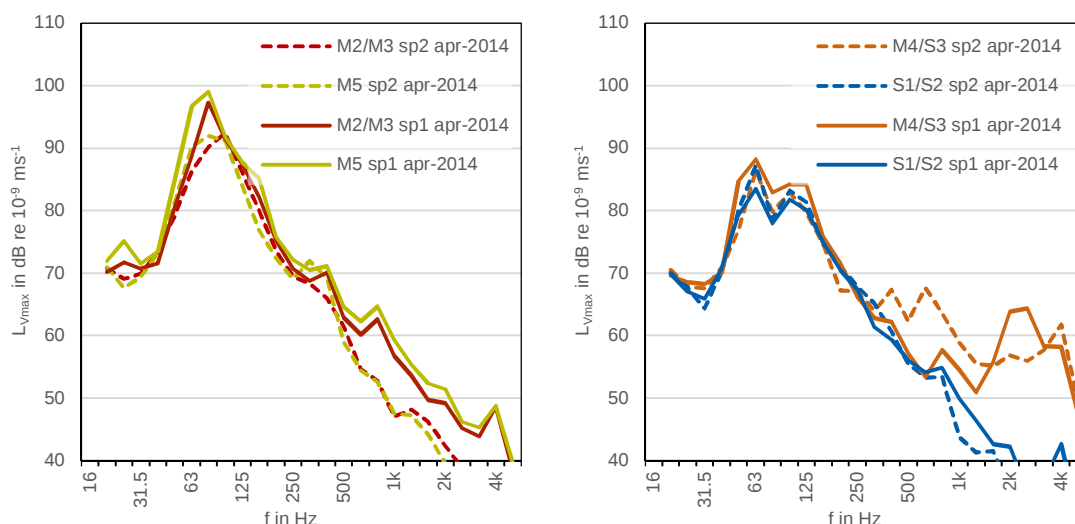
Bij Nieuwmarkt zuid gaan de impacts van passages over spoor 2 in het ritme van wielpassages. Bij passages over spoor 1 volgen de impacts elkaar sneller op, alsof er twee of meer voegen vlak achter elkaar liggen.



figuur 13 tijdssignalen van passages bij Nieuwmarkt zuid (links) en Nieuwmarkt noord (rechts),beiden over spoor 1

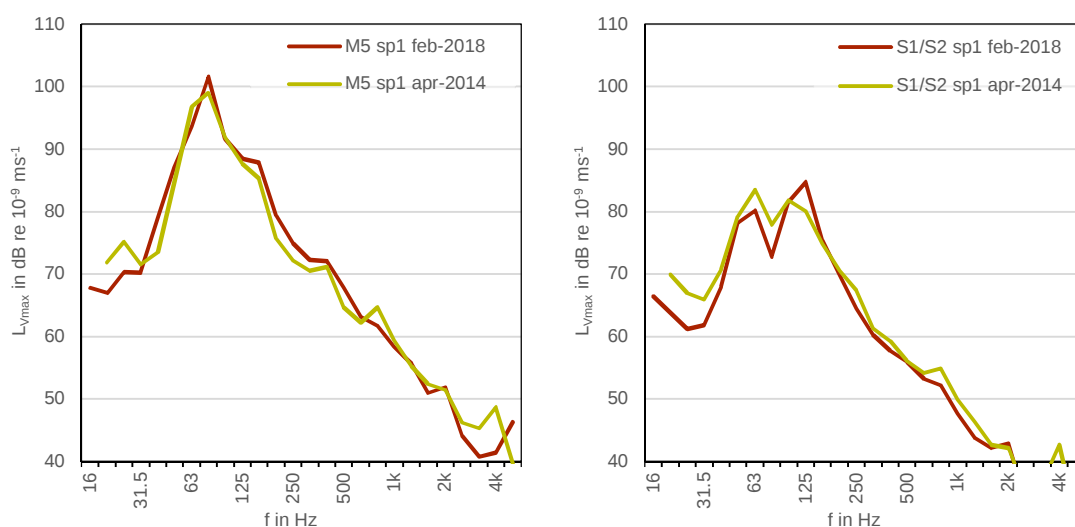
Piek bij passages van metro's over spoor 1

Passages van metromaterieel over spoor 1 (richting Waterloooplein) veroorzaken duidelijk hogere niveaus dan passages over spoor 2 (richting CS). Het effect is wel afhankelijk van het voertuigtype. De metro's (M2 en M2/3) veroorzaken op spoor 1 een forse piek in de 80 Hz 1/3 octaafband, terwijl ze dat op spoor 2 niet doen. Voor de sneltrams (S1/S2 en M4/S2) is er geen groot verschil tussen passages over spoor 1 of 2.



Getroffen bronmaatregelen zijn niet succesvol

Het slijpen van de rails in december 2014 heeft niet geleid tot een afname van de trillingsniveaus bij meetpunt zuid. Dit geldt ook voor het slijpen ES las en het aanbrengen van een extra ondersteuning. Sinds 2014 zijn de trillingsniveaus vrijwel gelijk gebleven.



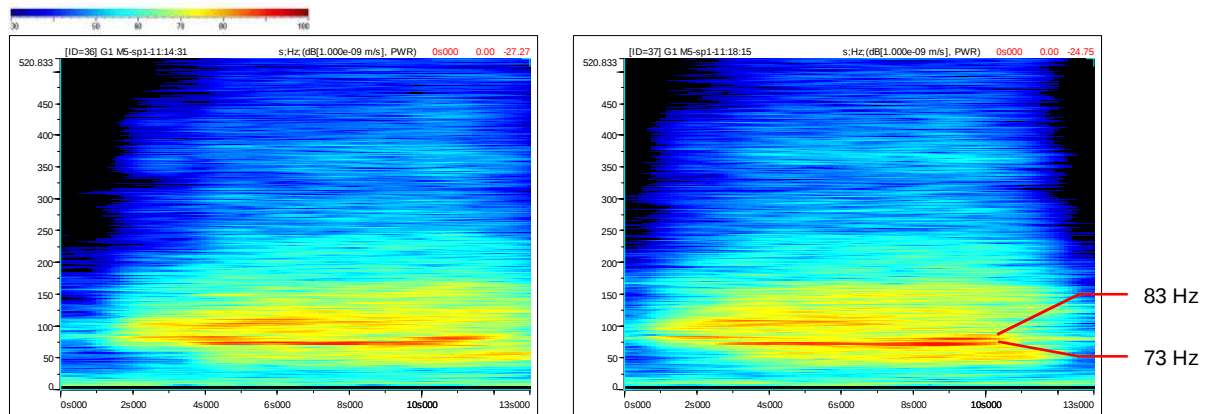
figuur 14 verschil tussen 2014 (voor maatregelen) en 2018 (na maatregelen); links M5, rechts S1/S2

Exacte frequentie van de pieken is onafhankelijk van de voertuigsnelheid

Uit smalbandanalyse (FFT) blijkt dat bij passages van M5 materieel over spoor 1 sprake is van twee dominante pieken in de 80 Hz 1/3 octaafband. Dit zijn circa 73 en circa 83 Hz, zie figuur 15. Het lijkt er op dat de Tc rijtuigen (voorste en achterste rijtuigen) andere eigenschappen hebben dan de M rijtuigen van M5. Hierover hebben we echter geen gegevens.

Bij M2 was er sprake van 1 piek die bij circa 75 Hz lag.

De frequenties zijn voor al het materieel onafhankelijk van de voertuigsnelheid.



figuur 15

smalbandspectra (1601 lijnen) van passages van M5 bij 32 km/uur (links) en 42 km/uur (rechts)

5 Mogelijke oorzaken van toename trillingen

5.1 Inleiding

Uit hoofdstuk 4 maken we op dat het verhoogde trillingsniveau bij Nieuwmarkt zuid bestaat uit stootgeluid en een frequentiepiek in de 80 Hz 1/3 octaafband. Stootgeluid wordt op beide sporen opgewekt, maar de tonale component is alleen aanwezig als metrovoertuigen over spoor 1 passeren. Dit gebeurt niet bij sneltrammaterieel en ook niet bij passages over spoor 2. In dit hoofdstuk gaan we in op mogelijke ontstaansmechanismen van beide fenomenen. Het is goed mogelijk dat de frequentiepiek samenhangt met het stootgeluid. Zo kan een resonantie worden geëxciteerd door breedbandige, impulsvormige aanstoting. Het is echter ook denkbaar dat de piek ontstaat door harmonische excitatie. We behandelen deze fenomenen daarom afzonderlijk. In paragraaf 5.2 kijken we naar mogelijke oorzaken van het stootgeluid. In hoofdstuk 5.3 behandelen we de tonale component. Tot slot bespreken we in paragraaf 5.4 de invloed van de demping en stijfheid van de bovenbouw op de gemeten trillingen.

5.2 Breedbandig stootgeluid

In deze paragraaf behandelen we de volgende mogelijke oorzaken:

- Losliggende dwarsligger/railbevestiging
- Lokale contactbruggen (drempel branddeur)
- Onderbrekingen in de spoorstaaf (ES lassen)

Losliggende dwarsligger of losse railbevestiging

Ballast heeft de eigenschap dat het inklinkt door dynamische belasting. Dit treedt vooral op onder betonnen dwarsliggers, waar de druk op de ballast zo hoog is dat het kan vergruizen. Dit gedrag is afhankelijk van de ondergrond en is niet bij iedere dwarsligger identiek. Hierdoor zijn kan het voorkomen dat dwarsliggers verschillend worden belast en dat sommige dwarsliggers zelfs los komen te liggen. Deze kunnen gaan rammelen als een trein passeert.

Een losse railbevestiging brengt, net als een losse dwarsligger, speling in het systeem. Als een voertuig een losse railbevestiging passeert, worden impulsvormige krachten opgewekt.

Bij een schouwing in de tunnel in april 2015 is globaal gecontroleerd op speling in de dwarsliggers en de railbevestiging. Hierbij zijn geen afwijkingen geconstateerd.

Lokale contactbruggen tussen rails en caisson

De locatie van de voormalige branddeuren bij Nieuwmarkt zuid ligt in het gebied waar nu een hoger trillingsniveau wordt gemeten dan voorheen. Om de branddeuren hermetisch te kunnen afsluiten was de spoorbaan in dwarsrichting voorzien van een drempel. Deze drempel heeft bij de opening van de tunnel trillingsproblemen veroorzaakt. Er was namelijk sprake van een contactbrug tussen het spoor en de drempel. Dit is destijds verholpen door flexibel materiaal aan te brengen tussen de rails en de drempel. Het is mogelijk dat de speling tussen drempel en rail onvoldoende is om de inverting van het railsysteem op te vangen.

Bij de renovatie in 2008 is de drempel blijven zitten. Bij de schouw in 2015 is waargenomen dat er geen direct contact is tussen de rails en de drempel. Het is echter niet zeker dat de speling voldoende is om contact te voorkomen.

Onderbrekingen in de spoorstaaf

In het probleemgebied bevinden zich elektrische scheidingslassen (ES-lassen) in zowel spoor 1 als spoor 2. Voor de renovatie waren ook isolatielassen aanwezig, maar deze hebben destijds niet geleid tot hoge trillingsniveaus. In 2014 zijn de ES-lassen aangewezen als de meest waarschijnlijke oorzaak van het stootgeluid bij station Nieuwmarkt zuid. Er zijn twee pogingen gedaan om de opwekking van trillingen te verminderen. Eerst is de bovenkant van het spoor glad geslepen. We gaan er van uit dat de ES las enkele maanden later geheel is vervangen. Dit moet echter nog worden uitgezocht. Beide maatregelen hebben in ieder geval niet geleid tot een daling van het trillingsniveau.

Samenvattend

Het stootgeluid wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de ES lassen. We kunnen echter niet uitsluiten dat de drempel van de branddeuren een rol spelen.

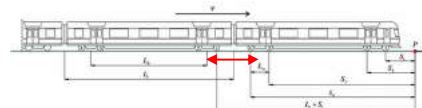
5.3 Frequentiepiek in de 80 Hz 1/3 octaafband

Aanstoting

Bij metro's en railvoertuigen in het bijzonder kunnen, zoals beschreven in paragraaf 2.1, verschillende mechanismen een rol spelen bij de opwekking van discrete tonen. Veel van deze mechanismen treden op bij veel lagere of juist hogere frequenties dan het geval is in de spoortunnel. Daarnaast is de frequentie volgens formule (1) afhankelijk van de voertuigsnelheid. Omdat het probleem in Amsterdam steeds optreedt bij een vaste frequentie, kunnen de volgende aanstootmechanismen worden uitgesloten als (enige) oorzaak van het trillingsprobleem.

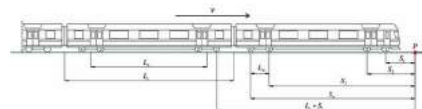
Periodieke aanstoting door de vaste afstand tussen de draaistellen

De frequentie is afhankelijk van de voertuigsnelheid en de afstand tussen de hartlijnen van de draaistellen. De frequentie is veel lager dan 80 Hz.



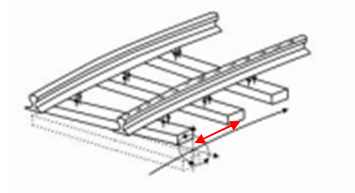
Periodieke aanstoting door de vaste afstanden tussen de wielassen

Het gaat hierbij om de afstand tussen twee wielassen op één bogie en de afstand tussen de achterste wielas van een bogie en de voorste van de volgende bogie. De frequentie is afhankelijk van de voertuigsnelheid en veel lager dan 80 Hz.



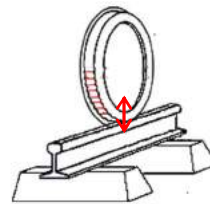
Periodieke aanstoting door de vaste afstanden tussen de railbevestigingspunten

De dwarsliggerpasseerfrequentie (sleeper passing frequency of fastener passing frequency), is afhankelijk van de voertuigsnelheid en lager dan 80 Hz.



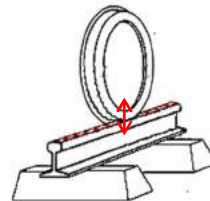
Ruwheidspiek in het contactvlak van het wiel, of polygonisatie

De frequentie die optreedt is afhankelijk van de voertuigsnelheid.



Ruwheidspiek in het contactvlak van de railkop of golfslijtage.

Slijtage is vaak het gevolg indien één van bovengenoemde fenomenen opspelen. In Amsterdam is dit niet aan de hand. Bij railruwheidsmetingen zijn geen afwijkingen gevonden. Bovendien is dit fenomeen afhankelijk van de voertuigsnelheid.

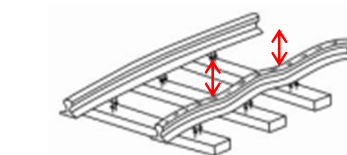


Resonanties

In figuur 4 zien we dat het wiel-railsysteem bestaat uit een complex samenhangend systeem van massa's, elastische elementen en dempende elementen. Dit betekent dat het systeem een groot aantal eigenfrequenties heeft. Resonantie is maximaal als de eigenfrequentie en de frequentie van de aanstoting gelijk zijn of als verschillende eigenfrequenties samenvallen. Eigenfrequenties van het wiel-railsysteem zijn, net als het trillingsprobleem in Amsterdam, onafhankelijk van de snelheid. Echter veel van deze eigenfrequenties zijn typisch veel hoger of lager dan 80 Hz. Hieronder volgt een overzicht van de belangrijkste eigenfrequenties.

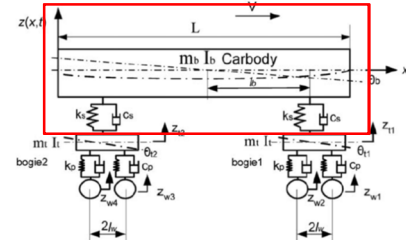
“Pinned-pinned” resonantie

Pinned-pinned resonanties zijn de eigenfrequenties van de rail met knopen ter plaatse van de railoplegging. Het gaat hierbij om modi in horizontale en in verticale richting. De optredende frequenties zijn in de regel veel hoger dan 80 Hz.



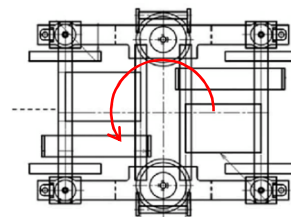
Resonanties van de bak op het onderstel

Hierbij kunnen modi optreden langs verschillende (draai)assen. Excitatie kan plaatsvinden door centripetale krachten in de boog. De frequenties zijn normaalgesproken lager dan 80 Hz.



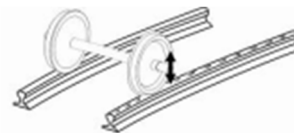
Oscillatie van het draaistel

Oscillatie van het draaistel treedt vooral op bij het rijden in bogen, maar het fenomeen treedt op bij veel lagere frequenties dan 80 Hz en bovendien is de frequentie ervan proportioneel met de voertuigsnelheid.



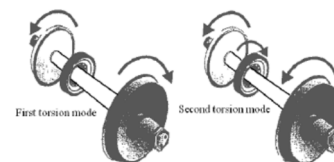
P2 resonantie, ofwel “loaded track” resonantie

P2 resonantie ontstaat door interactie tussen de onafgeveerde massa en de stijfheid van de baan. Bij railverkeer treedt dit fenomeen vaak op rond 70-80 Hz. Een duidelijke aanwijzing voor het optreden van P2 resonantie is het optreden van pieken van 73 Hz en 83 Hz bij passages van M5 materieel. De verhouding tussen deze frequenties komt overeen met de wortel van verhouding tussen de onafgeveerde massa's van motordraaistellen en de meeloopdraaistellen.



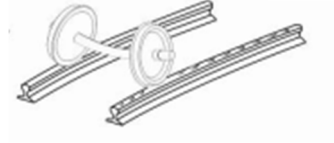
Torsie mode van een wielset

De eerste torsiemodus van de wielas ligt rond 80 Hz. Deze eigenfrequentie kan worden opgewekt door slipkrachten in de boog in combinatie met aandrijfkraften. “Rutting”, de tweede orde torsie modus van de aangedreven as, treedt op in bogen, maar dit gebeurt bij een frequentie tussen 240 en 400 Hz



Buigmodus van een wielset

De eerste buigmodus van een wielset ligt rond 80 Hz en kan dus een rol spelen bij de problematiek.



Samenvattend

Resonanties die een rol kunnen spelen bij het trillingsprobleem zijn P2 resonantie, en buig- en torsiemodi van de wielas.

5.4 Damping en stijfheid van de bovenbouw

Uit paragraaf 3.1 kunnen we opmaken dat de renovatie van het spoor heeft geleid tot een toename van de stijfheid van het systeem. Dit is waarschijnlijk de oorzaak van de verschuiving van het spectrum dat is te zien figuur 11. Het is echter niet de enige oorzaak van het probleem. Het verklaart immers niet dat het trillingsniveau bij Nieuwmarkt zuid wel en bij Nieuwmarkt noord niet is toegenomen.

5.5 Hypothese

De volgende hypothese past bij de veranderingen in de tunnel sinds 1980, de eigenschappen van het materieel, de resultaten van de metingen die tot nu toe zijn verricht en excitatiemechanismen en resonanties die optreden bij het metro- en sneltrammaterieel.

De toename van het trillingsniveau bij Nieuwmarkt zuid wordt veroorzaakt door impact in verticale richting (stootgeluid) ter plaatse van één doorsnede. Het ligt het meest voor de hand dat het stootgeluid wordt opgewekt door de ES lassen, maar we kunnen niet uitsluiten dat de drempel van de voormalige branddeuren een rol spelen.

Door de impact wordt op spoor 2 zogenaamde P2 resonantie opgewekt. De resonantiefrequentie valt mogelijk samen met een torsie-of buigmodus van de wielas. P2 resonantie vindt alleen plaats bij metromaterieel. Het sneltrammaterieel beschikt over wioldempers, waardoor deze modus sneller dooft. Vroeger werd de P2 resonantie minder sterk aangestoten, omdat op die plek geen stootgeluid werd opgewekt. Bovendien lag de resonantiefrequentie lager doordat de stijfheid van de bovenbouw lager was. Op spoor 1 wordt de P2 resonantiefrequentie minder sterk aangestoten omdat de rijtuigen na de impact sterk afremmen voor aankomst op station Nieuwmarkt. Mogelijk is ook de stijfheid van de bovenbouw van spoor 2 duidelijk lager dan van spoor 1, zodat de resonantiefrequentie in de minder gevoelig frequentiegebied ligt.

6 Meetprogramma

Om de hypothese in hoofdstuk 5.5 te verwerpen of bevestigen en aan te scherpen, kan beantwoording van de volgende vragen noodzakelijk of nuttig zijn:

- 1 Op welke locatie (kilometrerings in meters) wordt het stootgeluid precies opgewekt? Hebben we te maken met de effecten van de ES lassen of met de drempel van de branddeuren?
- 2 Wanneer ontstaat de 80 Hz piek precies. Is dit alleen na de impact op spoor 2, of treedt deze ook op andere momenten of locaties op? Is er een relatie met het rijden door de boog, of zien we dit effect ook op rechtstand?
- 3 Waarom is bij Nieuwmarkt noord geen sprake van stootgeluid? Zitten de ES lassen verder van de meetpunten af? Of is de overdracht van het spoor naar de tunnelwand daar gunstiger?
- 4 Wat is de stijfheid van de bovenbouw? Met deze parameter kan de P2 resonantiefrequentie worden berekend.
- 5 Wat zijn de exacte frequenties van de buig- en torsiemodi van de wielassen van M5 materieel? Vallen deze samen met P2 resonantie op spoor 2?
- 6 Is het mogelijk dat de wioldempers van het sneltrammaterieel P2 resonantie effectief tegengaan?

De eerste twee vragen kunnen worden beantwoord door het uitvoeren van trillingsmetingen op een railvoertuig tijdens een proefrit in de tunnel. Hierbij worden trillingen gemeten op de aspotten van verschillende wielassen, waarbij de locatie van het voertuig nauwkeurig wordt bepaald. In de tunnel kan dat met een spatial sensor in combinatie met de Correvit sensor. De metingen dienen smalbandig te gebeuren. Bij voorkeur en indien dat i.v.m. veiligheid mogelijk is, wordt spoor 1 in beide richtingen bereden. Zodoende wordt duidelijk of de aanstoting door de ES las inderdaad leidt tot P2 resonantie.

De vragen 3 en 4 kunnen worden beantwoord door het uitvoeren van metingen aan de baan tijdens een buitendienststelling. De overdracht van baan naar tunnelwand kan worden bepaald met behulp van kunstmatige excitatie, bijvoorbeeld een geïstrumenteerde hamer of valgewicht.

Het antwoord op de overige vragen kan worden gevonden door het uitvoeren van metingen aan een stilstaand voertuig. Hierbij moet het voertuig kunnen worden opgekrikt. Wij denken echter dat de meeste vragen ook kunnen worden beantwoord door het verzamelen van gegevens die al beschikbaar zijn.

Vervolgstappen

Wij adviseren om trillingen op een rijdend voertuig uit te voeren. De metingen zullen uitwijzen waar het stootgeluid precies ontstaat. Hierna kunnen maatregelen worden ontwikkeld om de excitatie te verminderen. Door het uitvoeren van metingen in twee rijrichtingen wordt duidelijk of inderdaad P2 resonantie optreedt ten gevolge van excitatie door de ES las. Indien dat het geval is, zal het aanpakken van stootgeluid direct leiden tot onderdrukking van P2 resonantie. Naar verwachting kan met de resultaten van de metingen op een rijdend voertuig voldoende informatie worden verzameld om een oplossing van het probleem te vinden.

7 Literatuur

- [1] Ombudsman Amsterdam, “Bespreking eerste resultaten metro onderzoek 14 mei 2018”, 27-06-2018
- [2] E. Nieuwenhuizen, T. van bon, *Trillingsmetingen in de tunnel onder de Nieuwmarktbuurt in Amsterdam*, , M+P Raadgevende ingenieurs, referentie M+P.GADM.14.01.1, 4 februari 2015
- [3] brief rapport 1568P (08-11-1985)
- [4] brief 1568-0717 (27-01-1983)
- [5] E. Nieuwenhuizen, Th. Höngens, *Geluid en trillingen door metro's in de tunnel onder de Nieuwmarktbuurt in Amsterdam*, M+P Raadgevende ingenieurs, referentie M+P.GADM.13.02.1, 4 september 2013.
- [6] E. Nieuwenhuizen, T. van Bon, *Historisch overzicht van trillingsmetingen in de tunnel onder de Nieuwmarktbuurt*, M+P Raadgevende ingenieurs, referentie M+P.GADM.13.03.1, 21 januari 2014.
- [7] W.J. van der Heijden, E. Nieuwenhuizen, *Railruwheidsmetingen aan het metrospoor in de tunnel onder de Nieuwmarktbuurt in Amsterdam*, M+P Raadgevende ingenieurs, referentie M+P.GADM.13.04.1, 16 januari 2014.
- [8] S. Riemers, Y.K. Wijnia, *Inspectie van de spouw tussen caisson en N.O.-toegang van het Nieuwmarktstation*, Van Dorsser, referentie 1568.K, 24 juni 1982.
- [9] S. Riemers, J.F. Cleij, *Trillingsoverdrachtmetingen stationstoegangen Nieuwmarktstation Zuid*, Van Dorsser, referentie 1568.H, 22 september 1980.
- [10] Patrascu, Gabriel: Avenio vibrations – research document; version 1; 2016 08 04;The Hague, HTM
- [11] prEN 15610:2017, Railway applications — Acoustics — Rail and wheel roughness measurement related to noise generation.