

Geluidsemissie Amsterdamse Trams Bepaling geluidemissiegetallen Combino tram



DMB en GVB

Dienst Milieu en Bouwtoezicht

december 2006
definitief

**Bijlage bij MER Herontwikkeling
Zeeburgereiland**

Nr 5

Geluidsemissie Amsterdamse Trams Bepaling geluidemissiegetallen Combino tram

DMB en GVB

dossier : X1172

registratienummer : MD-MO20061392

versie : 3.0

Dienst Milieu en Bouwtoezicht

december 2006

definitief

Samenvatting

In opdracht van de gemeente Amsterdam, Dienst Milieu- en Bouwtoezicht, is een akoestisch onderzoek verricht naar de optredende geluidsemissie van de Combino tram. De geluidsemissie van de Combino tram is duidelijk lager dan de geluidsemissie volgens de emissiegetallen in het reken- en meetvoorschrift wegverkeerslawaaï. Ook de snelheidsexponent is lager.

Voor 5 typen spoorconstructies is de geluidsemissie van de Combino tram bepaald, middels een groot aantal passagemetingen, conform de relevante regelgeving. De verschillen in de geluidsemissie op de verschillende spoorconstructie levert geen verrassing. Ballastspoor levert de laagste emissie. Spoor in asfalt levert de hoogste emissie. Opvallend is "spoor in klinkers", zoals dat wordt toegepast op de Singel, dat ook een lage emissie heeft.

Er zijn emissiegetallen vastgesteld voor geslepen spoor en ruw spoor. Een toename van 5 dB in de railruwheid heeft een toename van de geluidsemissie van 1.6 dB tot gevolg. Het effect van de railruwheid op de geluidsemissie van de Combino is beperkt. Mogelijk wordt dit veroorzaakt door een hoge wielruwheid. Nadere analyse van de wielruwheden zal dit uit moeten wijzen.

Aangezien in een representatieve situatie de ruwheid van het spoor grofweg zal liggen tussen glad (geslepen) en ruw spoor, wordt geadviseerd uit te gaan van de emissie op ruw spoor. Daarmee wordt in geringe mate een conservatieve benadering aangehouden.

De bepaalde emissiegetallen voor de Combino tram komen daarmee 8 tot 11 dB lager uit dan de emissiegetallen volgens het reken- en meetvoorschrift wegverkeerslawaaï. Voor ballastspoor bedraagt het verschil 8.5 dB, terwijl voor spoor in asfalt het verschil 11 dB bedraagt.

INHOUD	BLAD
1 INLEIDING	4
2 UITVOERING VAN DE METINGEN	5
2.1 Opzet van de geluidmetingen	5
2.2 Meetapparatuur	6
2.3 Meetlocaties	7
2.4 Meetomstandigheden	7
3 RESULTATEN	8
3.1 Geluidsmetingen	8
3.1.1 Spectrale geluidemissie Combino	8
3.1.2 Effect van afremmen / optrekken (tractie)	9
3.1.3 Resultaten geluidsmetingen op verschillende baanconstructies	10
3.2 Kilometrage van de gemeten trams	13
3.3 Trillingsmetingen	14
4 BEPALING EMISSIEGETALLEN COMBINO TRAM	15
4.1 Reken- en meetvoorschrift wegverkeerslawaai	15
4.2 Algemeen, proces in stappen	16
4.3 Railruwheid	16
4.4 Correctie geluidemissie op basis van ruwheid	18
4.5 Vaststelling snelheidscoëfficiënt	20
4.6 Emissiegetallen Combino-tram β	21
5 CONCLUSIES	24
BIJLAGE 1: OVERZICHT TYPEN BOVENBOUW	
BIJLAGE 2: BEPALING EMISSIEGETALLEN IN OCTAAFBANDEN	

1 INLEIDING

In opdracht van de gemeente Amsterdam, Dienst Milieu- en Bouwtoezicht, is een akoestisch onderzoek verricht naar de optredende geluidsemissie van de Amsterdamse trams. Hierbij is de nadruk gelegd op de geluidsemissie van de nieuwe trams, de zogenaamde Combino-trams. Tijdens de metingen zijn echter ook de passerende niet- Combino-trams ingemeten. De resultaten van deze laatste metingen worden in een separaat verslag behandeld [5]. In deze rapportage wordt alleen aandacht besteed aan de Combino-trams.

Daarnaast zijn op 2 april 2006 mobiele metingen aan de infrastructuur met gebruikmaking van een Combino-tram verricht, waarbij een microfoon onder de tram was gemonteerd. De resultaten hiervan worden eveneens in een aparte rapportage behandeld [6].

Dit rapport beschrijft de bepaling van emissiegetallen van de Combino-tram op basis van de resultaten van stationaire geluidsmetingen, op 5 verschillende locaties in Amsterdam. Het betreft vijf verschillende typen bovenbouw die in Amsterdam voorkomen: grasbaan, spoor met trambaanplaten, spoor in asfalt, ballastspoor en spoor in klinkers.

Uit de metingen worden de emissiegetallen voor de Combino-trams bepaald. De waarden zijn afhankelijk van het type baanconstructie. Deze emissiegetallen kunnen worden verwerkt in de bekende rekenprogrammatuur, waarmee geluidskaarten worden gemaakt. Tevens kunnen deze gegevens worden gebruikt bij het verrichten van akoestische onderzoeken, om nu en in de toekomst de geluidsbelasting van gebouwen vast te stellen. Daartoe zal de optredende geluidsbelasting ten gevolge van tramverkeer worden gecumuleerd met het wegverkeerslawaai.

2 UITVOERING VAN DE METINGEN

2.1 Opzet van de geluidmetingen

De emissiegetallen worden bepaald conform het reken- en meetvoorschrift wegverkeerslawaaï. De emissiegetallen beschrijven de geluidemissie als functie van de snelheid en de tram-verkeersintensiteit. De emissiegetallen kunnen dan worden gebruikt voor de bepaling van de geluidbelastingen op geluidsgevoelige bestemmingen in akoestische onderzoeken, en kunnen ook worden gebruikt voor de vervaardiging van geluidsbelastingkaarten. De methodiek is toegepast in een aantal commercieel verkrijgbare rekenpakketten voor akoestisch onderzoek.

Het reken- en meetvoorschrift wegverkeerslawaaï geeft echter geen beschrijving hoe emissiemetingen aan trams dienen te worden uitgevoerd. Algemeen worden metingen aan railverkeer uitgevoerd volgens NEN/ISO3095. Deze norm beschrijft de wijze waarop de geluidsmetingen en railruweidsmetingen dienen te worden uitgevoerd. Daarom zijn de emissiemetingen aan de trams ook volgens deze norm uitgevoerd. Opgemerkt dient te worden dat de eisen aan de railruweid in deze norm van toepassing zijn voor (zwaar) railverkeer. Het kan nodig zijn hiervan af te wijken en een hogere railruweid van het tramspoor toe te staan. Overigens is er (nog) geen representatieve railruweid voor tramspoor gedefinieerd, dit is ook afhankelijk van het onderhoudsregime. Aan de hand van de meetresultaten zal een representatieve situatie worden bepaald.

Het concept Reken- en meetvoorschrift railverkeer 2002 beschrijft in de bijbehorende Technische Regeling (Technische Regeling Emissiemeetmethoden Railverkeer 2004 d.d. 22 november 2004) de aanpak die dient te worden gehanteerd bij de vaststelling van de emissie van railverkeer. Dit houdt onder andere in dat de geluidsmetingen worden verricht op 7,5 m afstand van hart spoor, op een hoogte van 1,2 m boven bovenkant spoor. Deze meetposities zijn in het hier beschreven onderzoek aangehouden. Geluidsmetingen zijn verricht tijdens trampassages, van "kop tot staart". Gedurende de passage wordt een equivalent geluidsniveau bepaald.

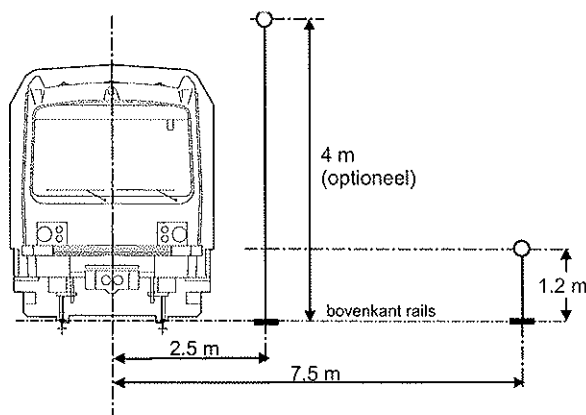
De emissiebepaling moet in principe worden uitgevoerd volgens de volgende uitgangspunten:

- De geluidmetingen volgens NEN/ISO3095;
- De emissiemeting wordt uitgevoerd op een karakteristiek type railconstructie;
- De metingen worden uitgevoerd met een representatieve onderhoudsconditie van spoor en tram;
- De ruweid van de rail wordt gemeten en getoetst;
- De geluidsmetingen worden uitgevoerd op (2,5 en) 7,5 meter afstand van hart spoor, op 1,2 m boven bovenkant spoor;
- De meting wordt uitgevoerd in tenminste 2 meetpunten, tenminste 15 meter van elkaar verwijderd;
- De metingen worden (bij voorkeur) uitgevoerd voor 25, 50 en 70 km/h, teneinde het relevante snelheidsbereik te kunnen beschrijven;
- Per meting en snelheid dienen tenminste 10 metingen te worden bepaald;
- Aanvullend worden metingen uitgevoerd bij tractie en beremming, ter bepaling van een eventuele toeslag voor deze situaties.

Het feit dat de emissiegetallen worden bepaald voor gebruik volgens de methode wegverkeerslawaai, en niet volgens de methode railverkeerslawaai, heeft de volgende consequenties:

- Er wordt uitgegaan van 1 bronhoogte voor het geluid (in plaats van 2).
- er wordt verondersteld dat het geluid zich gedraagt als een monopool, in plaats van een dipool (afstraling rondom naar alle kanten gelijk).

Figuur 1 geeft de positie van de microfoon, de optionele microfoon op 2,5 meter is niet toegepast.



Figuur 1 Meetopstelling.

In afwijking van de Technische Regeling voor de emissiebepaling wordt geen bronscheiding toegepast, waardoor de aanpak eenvoudiger wordt. Deze keuze is tot stand gekomen in overleg met de opdrachtgever.

2.2 Meetapparatuur

Bij de metingen is gebruik gemaakt van de volgende apparatuur:

Brüel & Kjær Modular Precision Sound Analyzer
 Brüel & Kjær calibrator
 Radar Snelheidsmeter Decatur

type 2260
 type 4231
 Range Master 715

2.3 Meetlocaties

In tabel 1 is weergegeven welke metingen zijn verricht.

Tabel 1: verrichte geluidsmetingen.

meetlocatie	Antwerpenbaan bij Beringestraat Sloten Huisnr 40			Churchillaan bij Schipbeekstr. Amstel Huisnr 59			Weteringschans bij Barleus gymnasium WTC Open ruimte nst Paradiso			Marnixstraat t.o. Lauriergracht Leidseplein Zijde Rozengracht			Singel Centraal Station Scheiding pand 421/423		
type baan	ballast			gras			betonplaten			asfalt			klinkers		
Railtype	S41			R60			R60			R60			R60		
Oplegging	duobloc dwarsliggers			onderbedbeton			onderbedbeton			onderbedbeton			onderbedbeton		
Bevestiging	Vossloh SKI 14			Star			Star			Star			Ortec klempaas		
Datum meting	27-09-05			28-9-2005 + 6-4-2006			6-10-05			11-10-05			11-10-05		
Lijnnr. Materieeltype passages	2	C	33	12	C/OM	25	6	C/OM	10	10	C	25	1	C	33
				25	C/OM	29	7	C	25	17	C	25	2	C	33
							10	C	25				5	11G	33

De meetlocaties zijn dusdanig gekozen dat in principe op elk type spoor dat in Amsterdam voorkomt, een serie metingen is verricht. Deze locaties worden als volgt gekenmerkt:

- type 1: ballastspoor (Antwerpenbaan);
- type 2: spoor in klinkers (Singel);
- type 3: spoor met trambaanplaten (Weteringschans);
- type 4: spoor in asfalt (Marnixstraat);
- type 5: grasbaan (Churchillaan).

In dit rapport worden de meetlocaties verder getypeerd door het type spoorconstructie.

De concept Technische Regeling voor bepaling van emissiegetallen railvoertuigen schrijft 3 passages per snelheidscategorie voor. Voor de snelheidsrange van trams zou de meting moeten worden uitgevoerd voor 3 snelheidscategorieën. In totaal zou het aantal passagemetingen dan tenminste 9 bedragen. Verder schrijft de regeling voor de metingen uit te voeren voor 2 railvoertuigen.

In geval van de Combino zijn de emissiemetingen uitgevoerd voor tenminste 14 metingen voor spoor met trambaanplaten. De meest uitgebreide meting is uitgevoerd op ballastspoor: 45 passagemetingen.

2.4 Meetomstandigheden

In onderstaande tabel is weergegeven wat de weersomstandigheden waren tijdens de metingen.

Tabel 2: Weersomstandigheden tijdens metingen.

Datum	Temperatuur [°C]	wind	Bewolgingsgraad [octa's]	Overig
27 sept. 2005	15	Z 4	8/8	Regenachtig
28 sept. 2005	16	W 4	3/8	-
6 okt. 2005	13	O 2	8/8	-
11 okt. 2005	18	ZO 3	0/8	-
12 okt. 2005	18	Z 4	2/8	-
6 april 2006	8	W 4	5/8	-

De weersomstandigheden hebben voldaan aan de eisen uit het Reken- en Meetvoorschrift Railverkeerslawaaai 2004 [3] (meteoraamcondities). Op 27 september 2005 zijn de metingen gestopt op het moment dat de sporen nat werden.

3 RESULTATEN

3.1 Geluidsmetingen

Voor ballastspoor zijn uitgebreide metingen uitgevoerd. De metingen zijn uitgevoerd op twee locaties met twee meetpunten. Daarmee is een uitgebreide dataset verkregen. Tevens zijn de metingen uitgevoerd over een breed snelheidsbereik: 25 tot 55 km/h. Metingen bij hogere snelheden zijn niet mogelijk gebleken in verband met de veiligheid. Deze hoge snelheden blijken in de regel ook niet voor te komen.

Voor 4 situaties zijn de metingen uitgevoerd enkele weken nadat het spoor is geslepen:

- type 2: spoor in klinkers (Singel);
- type 3: spoor met tramplaten (Weteringschans);
- type 4: spoor in asfalt (Marnixstraat);
- type 5: grasbaan op een betonnen onderbed (Churchilllaan).

Voor de grasbaan zijn tevens metingen uitgevoerd met golfslijtage.

De metingen voor type 1: ballastspoor, zijn uitgevoerd voor ongeslepen spoor. Daarbij werd ervan uitgegaan dat deze situatie representatief zou zijn voor een spoor met gemiddelde ruwheid.

Voor drie situaties zijn de railruwheden gemeten, waardoor het mogelijk is de geluidemissie te corrigeren voor railruwheid:

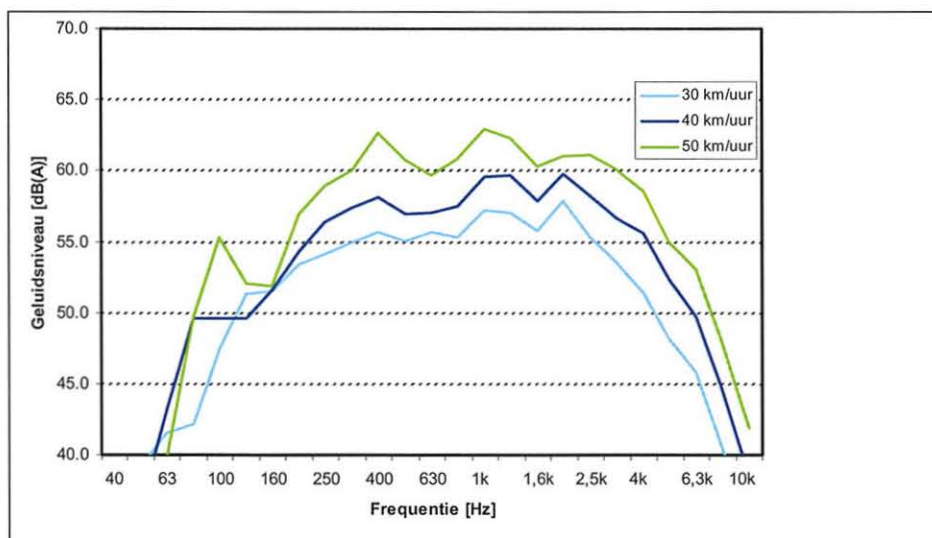
- type 1: ballastspoor (ongeslepen);
- type 5: grasbaan (geslepen);
- type 5: grasbaan (golfslijtage).

De keuze voor deze situaties maakt het mogelijk een beeld te krijgen van de spreiding in de railruwheid die voorkomt op het Amsterdamse tramnet. Over de correctie voor ruwheid volgt meer in sectie 4.4.

Alle Combinotrams die voor de emissiebepaling zijn gemeten zijn voorzien van wioldempers. De metingen zijn in de dienstregeling uitgevoerd. De gemeten trams zijn daardoor representatief voor de Combinotrams zoals die op dit moment in bedrijf zijn.

3.1.1 Spectrale geluidemissie Combino

Figuur 2 geeft de gemiddelde spectra bij 3 verschillende snelheden, voor de metingen op ballastspoor. Te zien is dat het spectrum vrij breedbandig is, waarbij het maximum tussen 500 Hz en 2 kHz ligt. Bij toename van de snelheid neemt het geluidsniveau over het gehele frequentiebereik gelijkmatig toe. Later in dit rapport zal de snelheidsafhankelijkheid van de geluidemissie worden vastgesteld.



Figuur 2: Gemiddelde meetresultaten, ballastspoor.

3.1.2 Effect van afremmen / optrekken (tractie)

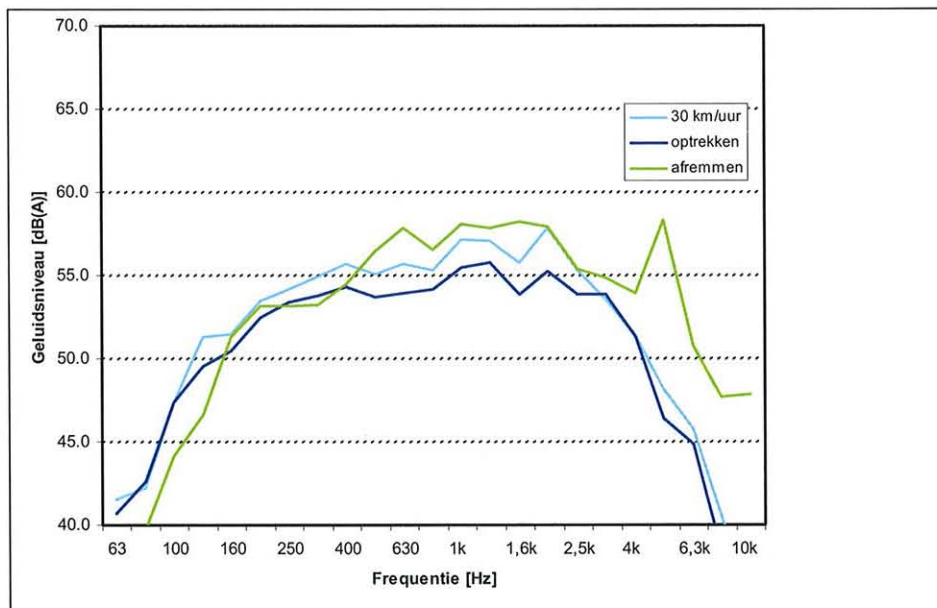
Figuur 3 geeft een overzicht van de geluidsniveaus die op ballastspoor zijn gemeten bij afremmen / optrekken (tractie), vergeleken met een tram die met een constante snelheid van 30 km/uur rijdt. Bij het afremmen / optrekken varieert de snelheid. De gemiddelde snelheid hiervan is ingeschat op basis van de gemeten snelheid in de meetdoorsnede.

- Gemiddelde snelheid optrekken: circa 30 km/uur;
- Gemiddelde snelheid afremmen: circa 15 km/uur.

Om te kunnen vergelijken is de in Figuur 3 gepresenteerde snelheid voor afremmen gecorrigeerd naar een gemiddelde snelheid van 30 km/uur.

Uit Figuur 3 blijkt dat de optredende geluidsniveaus bij optrekkende / afremmende trams niet significant afwijken van een tram die met een constante snelheid van 30 km/uur rijdt. De eventuele toename van het geluid ten gevolge van afremmen / tractie blijkt zeer beperkt zijn (hoogstens 1 dB). Hierom stellen wij voor geen toeslag voor afremmen/optrekken toe te passen. Dit is overigens in lijn met het Reken- en Meetvoorschrift Wegverkeerslawaaai (RMVW).

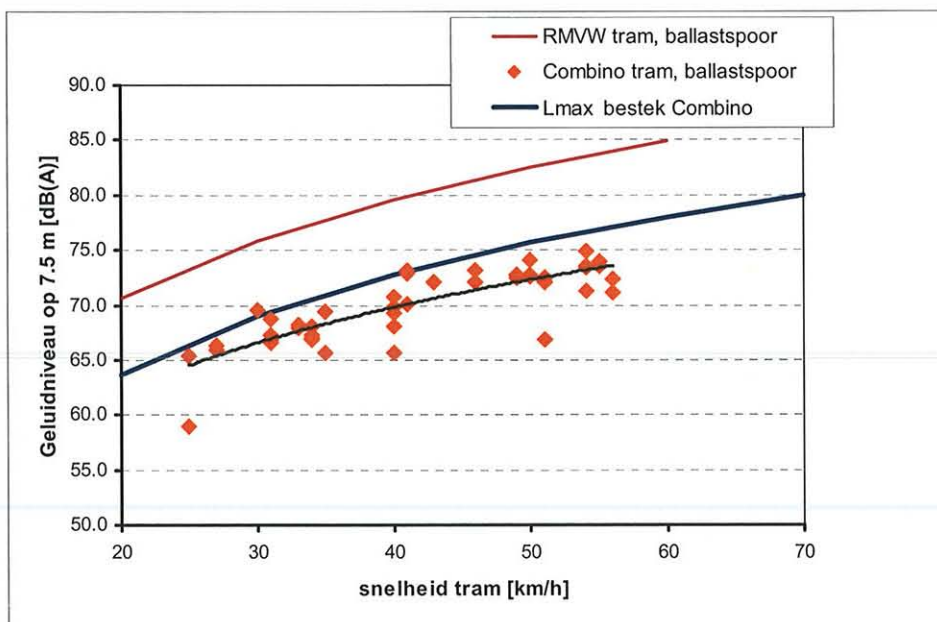
De metingen waarop deze conclusie wordt gebaseerd zijn verricht op ballastspoor. Het betreft hier echter een trameigenschap, en niet een spooreigenschap. Daarom is deze conclusie van toepassing op alle typen sporen.



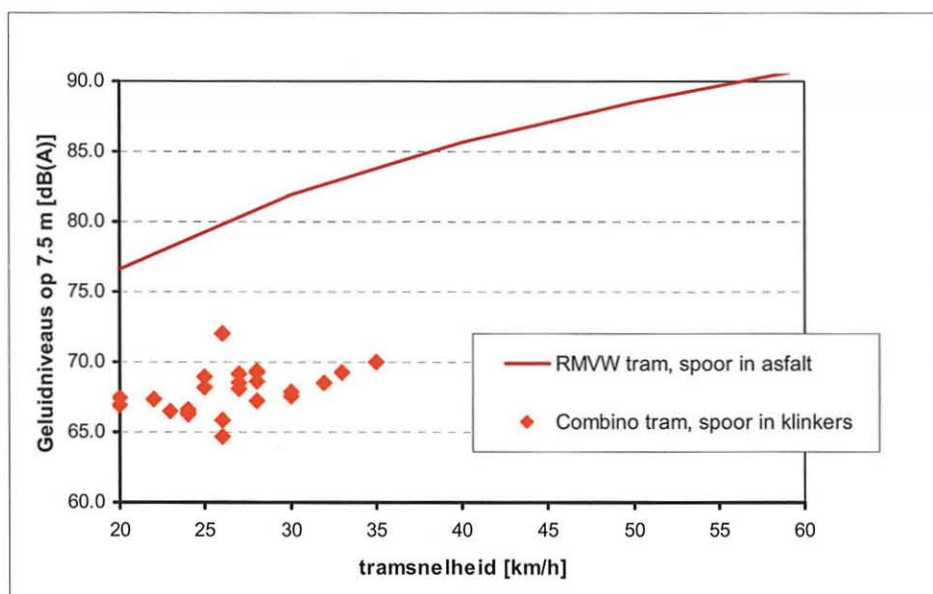
Figuur 3: Effect van afremmen / optrekken (tractie).

3.1.3 Resultaten geluidsmetingen op verschillende baanconstructies

Onderstaande figuren geven de gemeten geluidsniveaus per type baanconstructie, vergeleken met het RMVW [4]. De geluidsniveaus zijn gecorrigeerd voor de passagetijd. Overige correcties (zie hoofdstuk 4) hebben nog niet plaatsgevonden.

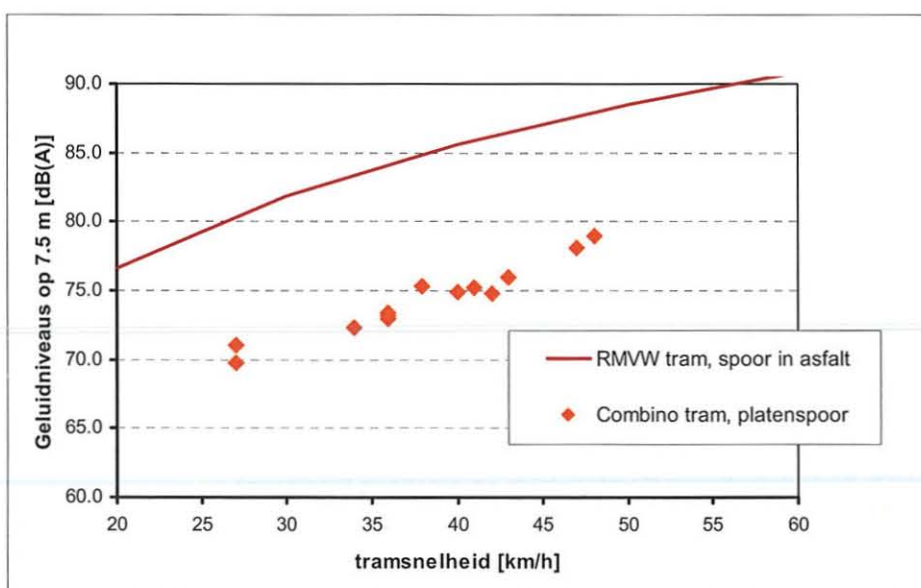


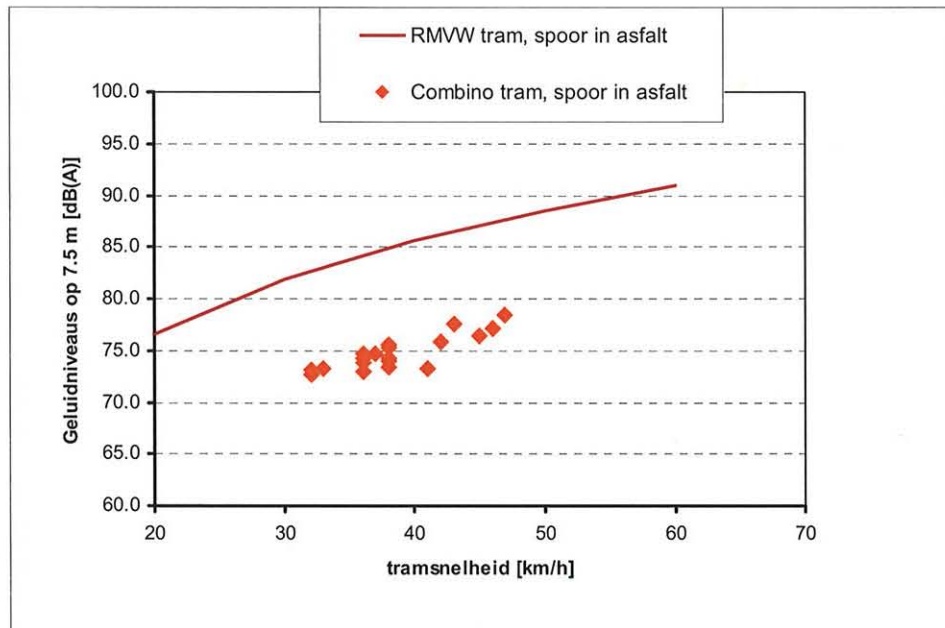
Figuur 4: Emissiemetingen Combinotram op ballastspoor (ongeslepen).



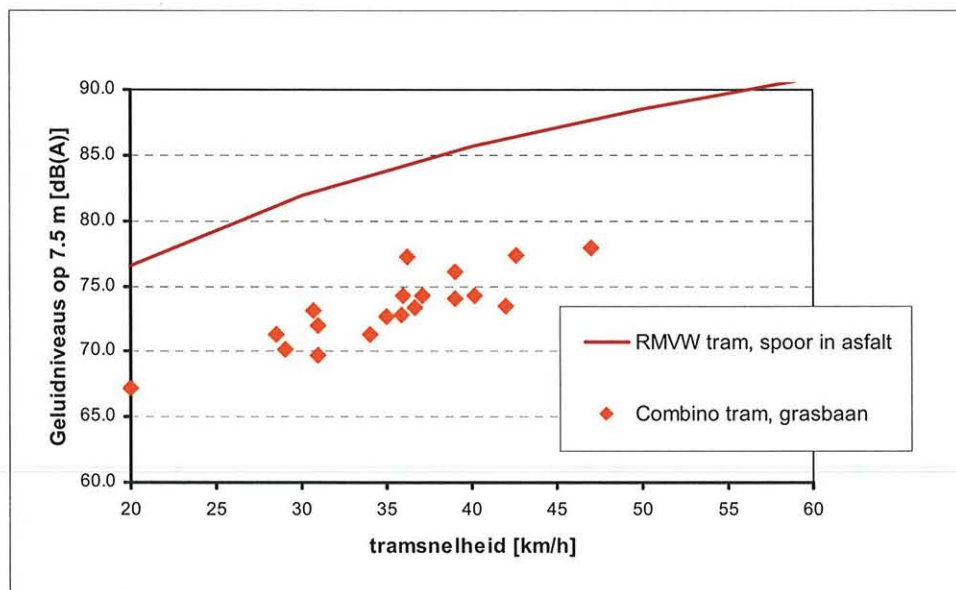
Figuur 5: Emissiemetingen Combinotram op spoor in klinkers met Ortec (geslepen).

Figuur 6: Emissiemetingen Combinotram op spoor met trambaanplaten (geslepen).





Figuur 7: Emissiemetingen Combinotram op spoor in asfalt (geslepen).



Figuur 8: Emissiemetingen Combinotram op grasbaan (geslepen).

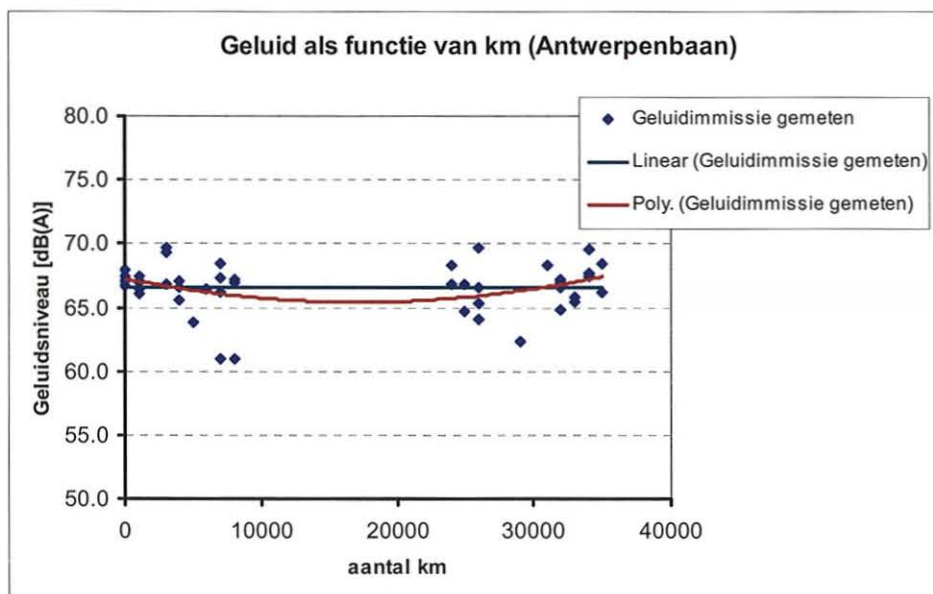
Uit de meetresultaten blijkt dat de geluidemissie van de Combino-tram duidelijk lager is dan de geluidemissie volgens het RMVW. De emissie van de Combino blijkt ca. 10 dB lager te zijn, maar deze waarden zijn nog niet gecorrigeerd voor railruwheid.

De spreiding in de meetresultaten is redelijk groot. Naarmate het aantal metingen toeneemt lijkt de bandbreedte ca. 10 dB te bedragen. Dit is echter niet afwijkend van andere metingen van de geluidemissie van trams, bijvoorbeeld de conventionele trams in Amsterdam.

Grofweg liggen de emissies van de verschillende spoorconstructies in dezelfde range. De ballastspoor constructie wijkt duidelijk af en levert een ca. 5 dB lagere geluidemissie.

3.2 Kilometrage van de gemeten trams

In de analyse is vastgesteld wat de invloed is op de geluidemissie van het aantal kilometers dat de trams hebben gereden. Het GVB draait de wielen van Combino-trams regelmatig (inmiddels na elke 20.000 km) af, waardoor polygonisatie van de wielen wordt beperkt. Verwacht kan worden, vanaf het moment van afdraaien, dat de wielruwheid toeneemt, en dat dus ook de geluidsuitstraling van de trams toeneemt. In onderstaande figuur is het geluidsniveau uitgezet tegen het (geschatte) aantal km dat is gereden sinds de laatste keer dat de wielen zijn afgedraaid, voor de metingen op ballastspoor. Het gemeten geluidsniveau is hierbij gecorrigeerd naar een snelheid van 30 km/uur.



Figuur 9 Geluidsniveau als functie van gereden afstand door de trams, na afdraaien van de wielen.

De naar de data gefitte curve loopt nagenoeg vlak. Dit betekent dat er geen reden is aan te nemen dat de geluidemissie toeneemt naarmate de het aantal gereden kilometers toeneemt. Echter, een tweede orde fit geeft een beeld dat de emissie, en dus de wielruwheid, eerst afneemt en vervolgens weer toeneemt. Dit is wel in lijn met de verwachting. Helaas zijn er geen metingen beschikbaar in de range 10.000 tot 20.000 km en boven de 40.000 km waarmee deze indruk bevestigd zou kunnen worden.

Hoewel er wel enige toename is te verwachten na een groot aantal kilometers mag op basis van deze resultaten worden geconcludeerd dat de gemeten trams representatief zijn voor de geluidemissie van de Combino-tram in Amsterdam.

Het GVB streeft er overigens naar dat de wielen van de trams worden afgedraaid na 20.000 km/h zodat er geen toename in de geluidemissie is te verwachten als gevolg van een toegenomen wielruwheid. De emissiegetallen in dit rapport zijn zelfs representatief voor trams die tot 35.000km hebben gereden na het afdraaien van de wielen.

Polygonisatie

In de lopende onderzoeken naar de geluidemissie van de Combino-tram is vastgesteld dat er polygonisatie (veelhoekigheid) van de wielen in het middelste draaistel optreedt. Deze polygonisatie veroorzaakt een geluidafstraling in de lagere frequentiebanden en zou optreden nadat meer dan 20.000 km is afgelegd, na de het afdraaien van de wielen.

In dit onderzoek is slechts in zeer geringe mate een toename van de geluidemissie geconstateerd naarmate de trams grotere afstanden hebben gereden na het afdraaien. Mogelijk treedt er wel polygonisatie op maar is het effect op het dB(A) niveau beperkt omdat deze frequenties niet zwaar wegen in de dB(A) waarde. De toename van de laagfrequente bijdrage kan echter wel goed hoorbaar zijn.

Op basis van de hogere orde curve fit in figuur 9 wordt verwacht dat de geluidemissie wel toe zal nemen naarmate de gereden kilometrages nog meer toeneemt.

3.3 Trillingsmetingen

Er zijn (ter controle) ook railtrillingsmetingen verricht op de Antwerpenbaan. Deze worden echter niet nader beschouwd. De trillingsmetingen zijn globaal geanalyseerd, waaruit geen bijzonderheden zijn gebleken. Hierom zijn er geen verdere analyses aan de trillingsmetingen uitgevoerd.

4 BEPALING EMISSIEGETALLEN COMBINO TRAM

4.1 Reken- en meetvoorschrift wegverkeerslawaai

De te bepalen emissiegetallen worden gebruikt conform het reken- en meetvoorschrift verkeerslawaai [4]. Dit voorschrift is herzien in 2002. Er wordt onderscheid gemaakt in rekenmethode I en rekenmethode II. Rekenmethode I geeft emissiegetallen in dB(A) niveau, terwijl methode II de geluidemissie in octaafbanden beschrijft.

De emissiegetallen in het voorschrift beschrijven de emissie zoals bepaald voor tramspoor op betonnen dwarsliggers in ballastbed en tramspoor in asfaltbeton. Een stangenspoor heeft volgens het reken- en meetvoorschrift een geluidemissie die overeenkomt met die van spoor in ballastbed.

De emissiegetallen volgens rekenmethode I:

$$E_{\text{tram, ballastbed}} = 25 + 30 \log(v_{\text{tram}}) + 10 \log(Q_{\text{tram}}/v_{\text{tram}})$$

$$E_{\text{tram, asfaltbeton}} = 31 + 30 \log(v_{\text{tram}}) + 10 \log(Q_{\text{tram}}/v_{\text{tram}})$$

waarin:

v_{tram} = rijsnelheid [in km/h]

Q_{tram} = de tram-verkeerintensiteit [/h]

De emissiegetallen volgens rekenmethode II:

$$E_{\text{tram}} = \alpha + \beta \log(v_{\text{tram}}) + 10 \log(Q_{\text{tram}}/v_{\text{tram}}) \quad (1)$$

waarin:

v_{tram} = rijsnelheid in [km/h]

Q_{tram} = de tram-verkeerintensiteit [/h]

$\beta = 30$.

α = constante volgens tabel 4.

Tabel 3: Emissiekental α per octaafband

Frequentie [Hz]	Octaafband i	Ballastbed of stangenspoor	Spoor in asfalt
63	1	29	32
125	2	39	47
250	3	46	54
500	4	53	59
1000	5	55	61
2000	6	54	58
4000	7	48	50
8000	8	36	38

4.2 Algemeen, proces in stappen

Op basis van de meetresultaten worden emissiegetallen vastgesteld conform de emissieformule in het reken- en meetvoorschrift rail verkeerslawaa. Het betreft met name de vaststelling van de constanten α en β . Het reken- en meetvoorschrift gaat uit van een constante (theoretische) snelheidsexponent β . In eerste instantie wordt deze snelheidsexponent niet gehanteerd, en worden zowel α als β bepaald aan de hand van de meetdata. In de bepaling van de emissieformules wordt dus op basis van de metingen een werkelijke snelheidsexponent β bepaald, conform formule (1).

Ten opzichte van de meetresultaten zijn de volgende correcties van toepassing:

1. Correctie voor passagetijd en meetduur: Dit is een correctie vanwege de wijze waarop de metingen zijn verricht, op 7,5 m alsmede kopstaart-metingen.

$$E_{\text{tram, corr.}} = E_{\text{tram}} + 10 \log (Q_{\text{tram}}/V_{\text{tram}})$$

2. Overdrachtscorrectie. Hiermee wordt gecorrigeerd voor de geometrische uitbreiding en de overdracht door reflecties die optreden in harde bodemvlakken (bijlage 2).

3. Correctie voor railruwheid, zie paragraaf 4.3.

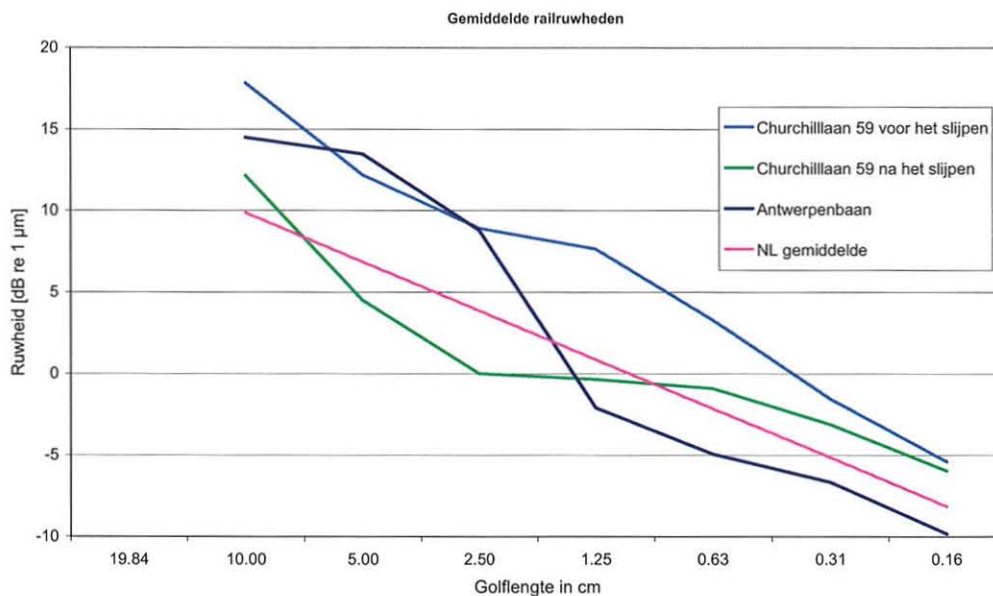
Op basis van de gemeten railruwheden en de bijbehorende geluidemissie is het effect van de railruwheid op de geluidemissie vastgesteld. Daarbij worden de gemeten railruwheden gemiddeld en gestileerd, waardoor de spectrale vorm geen invloed heeft op de geluidemissie, en de snelheidsafhankelijkheid van de emissie.

De geluidemissie wordt vastgesteld voor gladde (geslepen) rail en rail met hoge ruwheid.

4.3 Railruwheid

Voor drie situaties zijn de railruwheden gemeten, waardoor het mogelijk is de geluidemissie te corrigeren voor railruwheid:

- type 1: ballastspoor (ongeslepen)
- type 5: grasbaan (geslepen)
- type 5: grasbaan (golfslijtage).



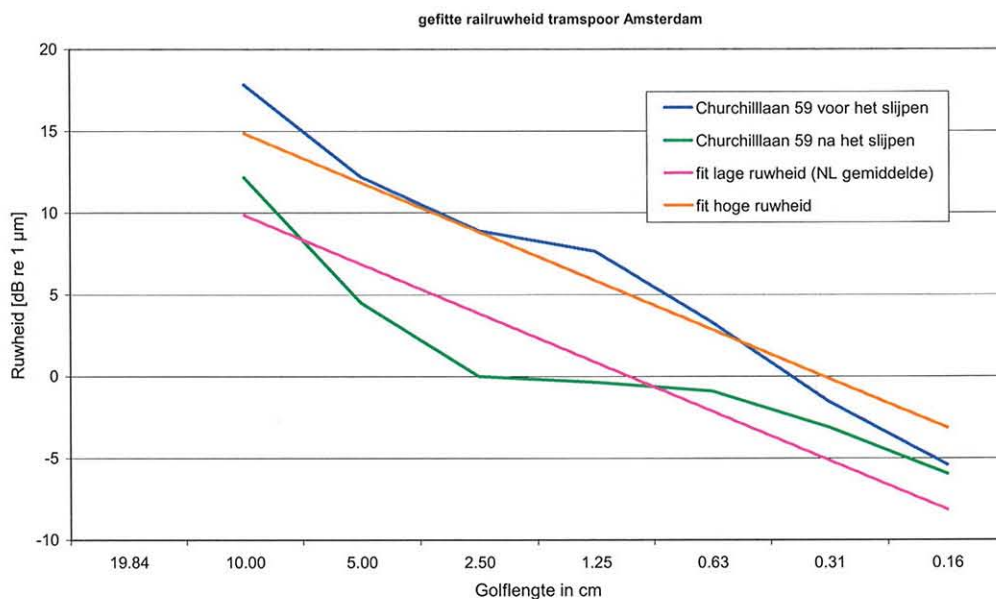
Figuur 10: Gemeten railruwheden

Figuur 10 geeft de gemeten railruwheid weer voor drie situaties. In geval van de ongeslepen grasbaan was sprake van golfslijtage. De golflengte van de golfslijtage was echter dermate groot dat deze buiten het spectrum valt dat relevant is voor de geluidemissie, en ook niet kan worden gemeten met de gebruikte meetapparatuur. Eigenlijk is er voor dit spoor over het gehele spectrum sprake van een verhoogd ruwheidniveau. In de meest relevante banden bedraagt het verschil ca. 8 dB ten opzichte van de ruwheid van dit spoor na het slijpen.

De ruwheid voor de ballastbaan heeft een opvallend verloop waarbij voor grotere golflengte (lagere frequenties) een relatief hogere ruwheid en voor kortere golflengte (hogere frequenties) een relatief lagere ruwheid is vastgesteld.

Ter vergelijking is de voor het Nederlandse hoofdspoor gemiddelde ruwheid weergegeven. Daarbij valt op dat dit NL-gemiddelde ook een goed gemiddelde levert voor de gemeten tramsporen na slijpen.

Op basis van deze metingen wordt voorgesteld om voor de bepaling van de emissiegetallen uit te gaan van gemiddelde ruwheidwaarden. Aangezien de NL-gemiddelde ruwheid een goede gemiddelde ruwheidwaarde van geslepen spoor geeft en ook een karakteristiek ruwheidverloop beschrijft, wordt dit ruwheidspectrum daarvoor gehanteerd.



Figuur 11: Gefitte railruwheden voor glad en ruw spoor.

In bovenstaande figuur zijn de hoge en lage ruwheid gefit, uitgaande van de NL gemiddelde ruwheid. In deze vereenvoudigde ruwheidscurven zijn gelijke hellingen aangehouden als de NL gemiddelde ruwheid. De hoge ruwheid curve ligt uniform 5 dB hoger dan het NL gemiddelde.

4.4 Correctie geluidemissie op basis van ruwheid

Op basis van de gestileerde spectra in Figuur 10 worden de gemeten geluidemissieniveaus gecorrigeerd. De NL gemiddelde ruwheid (geslepen spoor) is daarbij het uitgangspunt voor glad spoor en de hoge ruwheid zal worden gebruikt om de emissie op ruw spoor vast te stellen.

Een belangrijk uitgangspunt daarbij is dat daarmee wordt verondersteld dat rolgeluid de dominante geluidsbron vormt in de vastgestelde geluidsemissie.

Bij de correctie van de railruwheid op de geluidsemissie dient wel rekening gehouden te worden met de wielruwheid. De geluidemissie van de tram is lineair afhankelijk van de totale ruwheid. Het geluidniveau dat wordt geproduceerd door het wiel kan worden beschreven als:

$$L_{p,veh}(f) = L_{Hpr,veh}(f) + L_{r,tot}(f)$$

Terwijl de geluidsproductie van de rail kan worden beschreven door:

$$L_{p,tr}(f) = L_{Hpr,tr}(f) + L_{r,tot}(f)$$

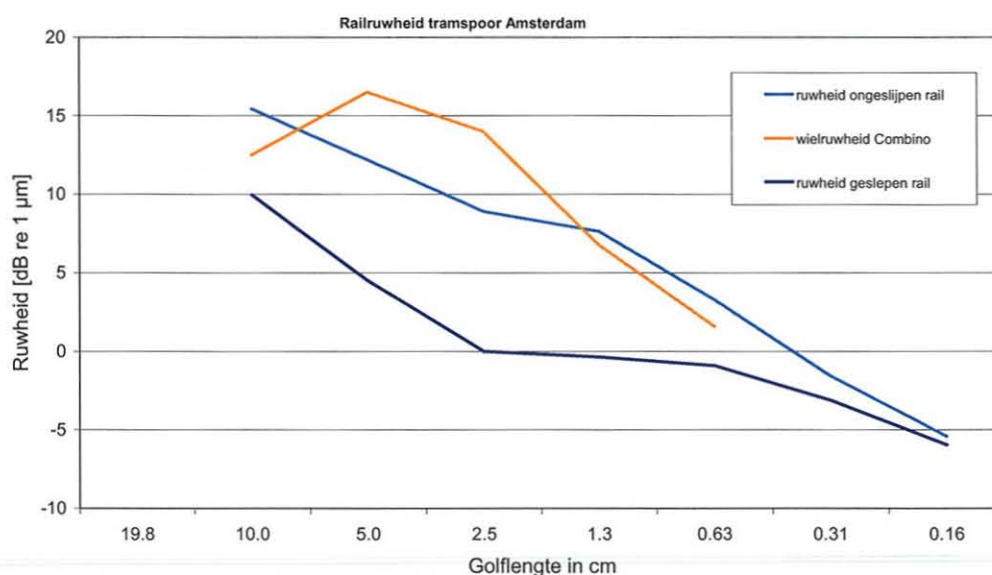
In deze vergelijking zijn:

- $L_{p,veh}$ = het geluidsniveau geproduceerd door het wiel,
 $L_{Hpr,veh}$ = de overdrachtfunctie van het wiel,
 $L_{r,tot}$ = het totale ruwheidniveau,
 $L_{p,tr}$ = het geluidsniveau geproduceerd door de rail,
 $L_{Hpr,tr}$ = de overdrachtfunctie van de rail,

De totale ruwheid is de energetische som van de wiel- en de railruwheid:

$$L_{r,tot}(f) = L_{r,wiel}(f) + L_{r,rail,gemeten}(f)$$

Op basis van de twee datasets met gemeten railruwheid, die onderling afwijkend zijn en de gemiddelde geluidsniveaus voor de Combino, en een zelfde overdrachtfunctie voor wiel en rail, kan een veronderstelde wielruwheid worden vastgesteld. Daarvoor is uitgegaan voor twee datasets voor de grasbaan (Churchilllaan), een met hoge railruwheid en een met lage railruwheid, ofwel voor en na slijpen. De resultaten zijn weergegeven in de onderstaande figuur. De veronderstelde wielruwheid is dus een gemiddelde wielruwheid voor de trams gemeten op de Churchilllaan. Omdat in sectie 3.2 is aangetoond dat de wielruwheid redelijk constant is, is deze aanname geoorloofd.



Figuur 12: Veronderstelde wielruwheid op basis van de meetdata.

Het is niet mogelijk om voor alle banden een betrouwbare wielruwheid te bepalen. Voor de meest relevante frequentiebanden is dit echter wel mogelijk. Figuur 12 geeft aan dat de wielruwheid dominant is. Op basis van de verschillen in de totale ruwheid zijn de gemeten geluidsemissies gecorrigeerd, waarna de emissiegetallen representatief voor glad spoor volgens de gestileerde lage ruwheid grafiek. Daarbij is ervan uitgegaan dat alle geslepen sporen dezelfde railruwheid hebben als de geslepen grasbaan.

Voor de lage ruwheid (geslepen) sporen zijn de volgende correcties voor railruwheid toegepast op de meetdata:

Tabel 4: Railruwheidcorrectie voor geslepen spoor

Frequentie [Hz]		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Correctie	α	-0.960	2.554	3.088	0.315	-1.740	-2.410	-0.326	0.129
	β	0.000	-1.896	-1.980	-0.063	1.070	1.310	-0.073	-0.339

Tabel 5: Railruwheidcorrectie voor (ongeslepen) ballast spoor

Frequentie [Hz]		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Correctie	α	-2.230	0.615	2.661	4.320	3.696	0.069	-0.898	-0.103
	β	0.000	-1.536	-2.473	-2.934	-2.330	0.246	0.777	0.201

Op basis van Figuur 11 kan vervolgens een toename van de emissie voor ruw spoor worden bepaald. Dit verschil wordt als een toename gepresenteerd ten opzicht van de emissie van geslepen spoor, zoals weergegeven in Tabel 6. Hoewel deze emissiecorrectie correspondeert met een railruwheid die 5 dB hoger is, zijn de correctiewaarden lager. Dit is een gevolg van de hoge wielruwheid die het effect van de toename van de railruwheid "dempt".

Tabel 6: Railruwheidcorrectie voor ruw spoor

Frequentie [Hz]		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Correctie	α	2.46	2.46	0.83	0.76	1.58	2.15	1.78	1.10

4.5 Vaststelling snelheidscoëfficiënt

Vervolgens kan de snelheidscoëfficiënt β in de emissieformule (1) voor de Combinotram worden vastgesteld. Op basis van de meetdata, gecorrigeerd voor railruwheid en overdracht, is per spoorconstructie een snelheidsexponent β bepaald. De resultaten zijn weergegeven in onderstaande tabel, en worden vergeleken met de bekende waarden voor trams volgens het RVMW.

Tabel 7: Op basis van metingen bepaalde emissiegetallen β voor de Combino-tram, vergeleken met het RVMW.

Type spoor	β
RMVW, ballastbed	30,0
RMVW, beton	30,0
Ballastspoor	24,8
Spoor in asfalt	28,1
Spoor met trambaanplaten	26,2
Grasbaan	26,6
Spoor in klinkers	11,8

De waarde bij spoor in klinkers moet als niet representatief worden beschouwd. De metingen zijn uitgevoerd over een klein snelheidsbereik, waardoor er veel onzekerheid in de bepaalde snelheidscoëfficiënt zit.

De waarden voor α liggen in alle gevallen duidelijk lager dan de snelheidsexponent met waarde 30 volgens het RMVW. Gemiddeld bedraagt $\alpha = 26,0$. Voorgesteld wordt voor alle sporen en alle frequentiebanden, een α gelijk aan 26,0 te hanteren. Verwacht mag worden dat daarmee de resultaten voor de emissiegetallen gelijkmatiger en daarmee betrouwbaarder zijn.

4.6 Emissiegetallen Combino-tram β

Vervolgens zijn met een vaste snelheidsexponent gelijk aan 26 de spectrale emissiegetallen vastgesteld. Tabel 8 geeft de resultaten voor α , bepaald conform SRMI, uitgaande van geslepen spoor. Daarbij zijn correcties uitgevoerd voor de geometrische spreiding en overdracht.

Tabel 8: Emissiegetallen Combino tram op geslepen spoor, bepaald conform SRMI.

Type baan	Coëfficiënt α	Coëfficiënt β
Ballastspoor	20.9	26
Grasbaan	23.4	26
Spoor in asfalt	23.7	26
Spoor met trambaanplaten	23.3	26
Spoor in klinkers	20.7	26

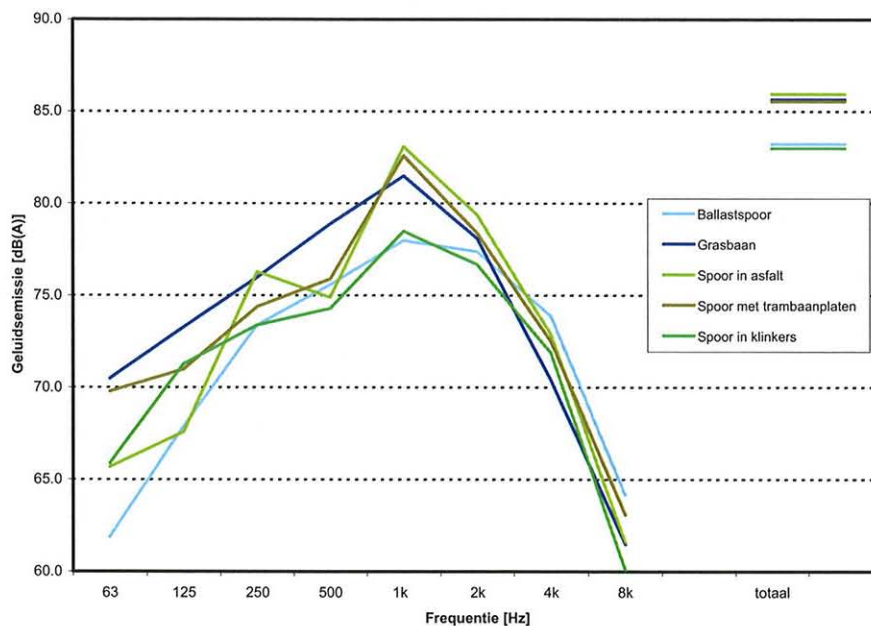
Vervolgens zijn de emissiegetallen per octaafband bepaald, waarbij correcties voor de overdracht zijn uitgevoerd conform het Reken en meetvoorschrift railverkeerslawaai. Omdat de emissietermen zullen worden toegepast volgens de bronbeschrijving voor wegverkeerslawaai, zijn de emissiegetallen bepaald onder de aanname dat de bron het karakter van een monopool heeft.

Tabel 9: Emissiegetallen Combino tram op geslepen spoor, bepaald conform SRMII, met $\beta = 26,0$.

Type baan	Coëfficiënt	Frequentieband [in Hz]							
		63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Ballastspoor	α	34.7	40.7	46.2	48.4	50.8	50.2	46.7	37.0
Grasbaan	α	43.3	46.1	48.8	51.7	54.3	50.9	43.2	34.3
Spoor in asfalt	α	38.5	40.4	49.1	47.7	55.9	52.2	45.7	34.4
Spoor met trambaanplaten	α	42.6	43.8	47.2	48.7	55.4	51.2	45.3	35.9
Spoor in klinkers	α	38.7	44.1	46.2	47.1	51.3	49.5	44.7	32.9

In Figuur 13 zijn de spectrale emissies van de Combino-tram weergegeven voor de verschillende typen bovenbouw. Daarbij valt op dat de verschillen in emissie over het gehele spectrum optreden. Uitzondering daarbij is de grasbaan, waarbij de emissie bij lagere frequenties in verhouding hoger is, terwijl voor hogere frequenties de emissie juist lager is.

Hierbij is van belang te constateren dat deze emissie zuiver de bronterm betreft. Het effect van absorptie van de baan, bijvoorbeeld de grasbaan en ballastbaan, is in deze emissie niet terug te vinden. Die worden in het akoestisch model in het overdrachtpad in rekening gebracht.



Figuur 13: Spectrale emissie van de Combino bij 50 km/h op geslepen spoor.

Voor ongeslepen spoor kunnen de waarden voor α worden verhoogd met waarden volgens Tabel 6. Dit levert dan de volgende emissiegetallen in Tabel 10.

Tabel 10: Emissiegetallen Combino tram op ruw spoor, bepaald conform SRMI.

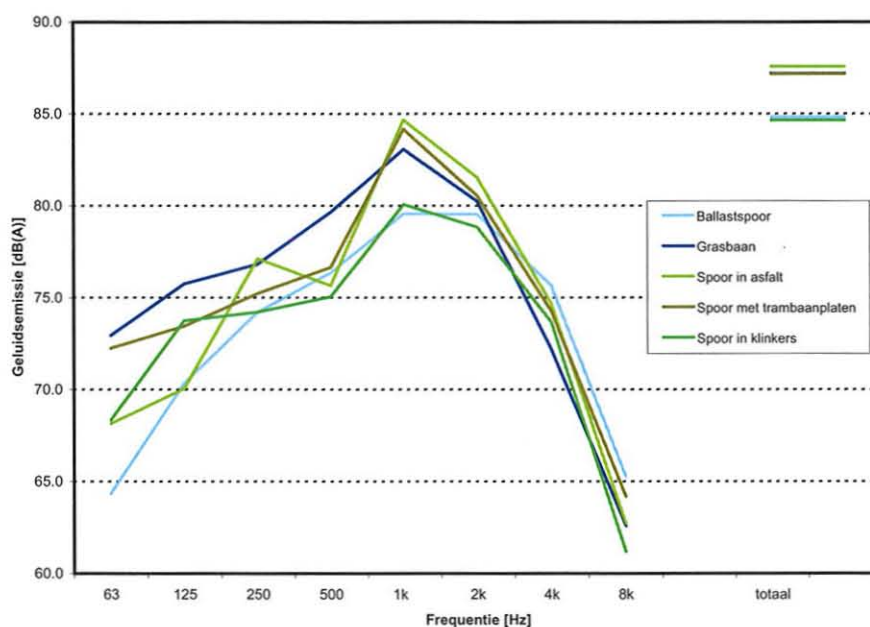
Type baan	Coëfficiënt α	Coëfficiënt β
Ballastspoor	22.5	26
Grasbaan	24.9	26
Spoor in asfalt	25.3	26
Spoor met trambaanplaten	24.9	26
Spoor in klinkers	22.4	26

Wederom zijn vervolgens de emissiegetallen per octaafband bepaald, waarbij correcties voor de overdracht zijn uitgevoerd conform het Reken en meetvoorschrift railverkeerslawaai, uitgaande van een monopool bron.

Tabel 11: Emissiegetallen Combino-tram op geslepen spoor, bepaald conform SRMII, met $\beta = 26,0$.

Type baan	Coëfficiënt	Frequentieband [in Hz]							
		63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Ballastspoor	α	37.2	43.2	47.0	49.2	52.4	52.4	48.5	38.1
Grasbaan	α	45.8	48.6	49.6	52.5	55.9	53.1	45.0	35.4
Spoor in asfalt	α	41.0	42.9	49.9	48.5	57.5	54.4	47.5	35.5
Spoor met trambaanplaten	α	45.1	46.3	48.0	49.5	57.0	53.4	47.1	37.0
Spoor in klinkers	α	41.2	46.6	47.0	47.9	52.9	51.7	46.5	34.0

De spectrale vorm van de geluidemissie wijzigt in beperkte mate. De uniforme toename van de railruwheid met 5 dB levert een toename van de geluidemissie van 1.6 dB(A).



Figuur 14: Spectrale emissie van de Combino bij 50 km/h op ruw spoor.

5 CONCLUSIES

De geluidemissie van de Combino tram is duidelijk lager dan de geluidemissie volgens het RMVW. Ook de snelheidsexponent is lager. Op basis van geluidmetingen zijn emissiegetallen voor Combino tram bepaald op een vijftal spoorconstructies:

- type 1: ballastspoor (Antwerpenbaan);
- type 2: spoor in klinkers (Singel);
- type 3: spoor met trambaanplaten (Weteringschans);
- type 4: spoor in asfalt (Marnixstraat);
- type 5: grasbaan (Churchilllaan).

Er zijn emissiegetallen vastgesteld voor geslepen spoor en ruw spoor. Een toename van 5 dB in de railruwheid heeft een toename van de geluidemissie van 1.6 dB tot gevolg. Het effect van de railruwheid op de geluidemissie van de Combino is beperkt. Mogelijk wordt dit veroorzaakt door een hoge wielruwheid. Nadere analyse van de wielruwheden zal dit uit moeten wijzen.

Aangezien in een representatieve situatie de ruwheid van het spoor grofweg zal liggen tussen glad (geslepen) en ruw spoor, wordt geadviseerd uit te gaan van de emissie op ruw spoor. Daarmee wordt in geringe mate een conservatieve benadering aangehouden.

De emissieformule conform rekenmethode II voor de Combino-tram wordt daarmee:

$$E_{\text{tram}} = \alpha + \beta \log(v_{\text{tram}}) + 10 \log(Q_{\text{tram}}/v_{\text{tram}})$$

waarin:

v_{tram} = rijsnelheid in [km/h]

Q_{tram} = de tram-verkeerintensiteit [/h]

$\beta = 26$.

α = constante volgens Tabel 12.

Tabel 12: Emissiegetallen Combino tram, bepaald conform SRM2, met $\beta = 26,0$.

		Frequentieband [in Hz]							
Type baan	Coëfficiënt	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Ballastspoor	α	37.2	43.2	47.0	49.2	52.4	52.4	48.5	38.1
Grasbaan	α	45.8	48.6	49.6	52.5	55.9	53.1	45.0	35.4
Spoor in asfalt	α	41.0	42.9	49.9	48.5	57.5	54.4	47.5	35.5
Spoor met trambaanplaten	α	45.1	46.3	48.0	49.5	57.0	53.4	47.1	37.0
Spoor in klinkers	α	41.2	46.6	47.0	47.9	52.9	51.7	46.5	34.0

Onderstaande tabel geeft een grove indeling van de geluidsproductie van diverse typen bovenbouwconstructie, waarmee een snelle vergelijking van de akoestische eigenschappen van de spoorconstructies mogelijk is. Daarbij is tevens het effect van de akoestische omgeving indicatief in rekening gebracht.

Tabel 13 : Relatieve geluidsproductie combino-trams, conform SRMI.

Spoor	Omgeving	Spoorconstructie	Geluidsproductie [dB(A)]
"zacht"	akoestisch zacht	Ballastspoor	$22.5 + 26 \cdot \log v_{\text{tram}}$
"hard"	akoestisch zacht	Grasbaan	$24.9 + 26 \cdot \log v_{\text{tram}}$
"hard"	akoestisch hard	Spoor in asfalt	$25.3 + 26 \cdot \log v_{\text{tram}} + 3$
"hard"	akoestisch hard	Spoor met trambaanplaten	$24.9 + 26 \cdot \log v_{\text{tram}} + 3$
"zacht"	akoestisch hard	Spoor in klinkers	$22.4 + 26 \cdot \log v_{\text{tram}} + 3$

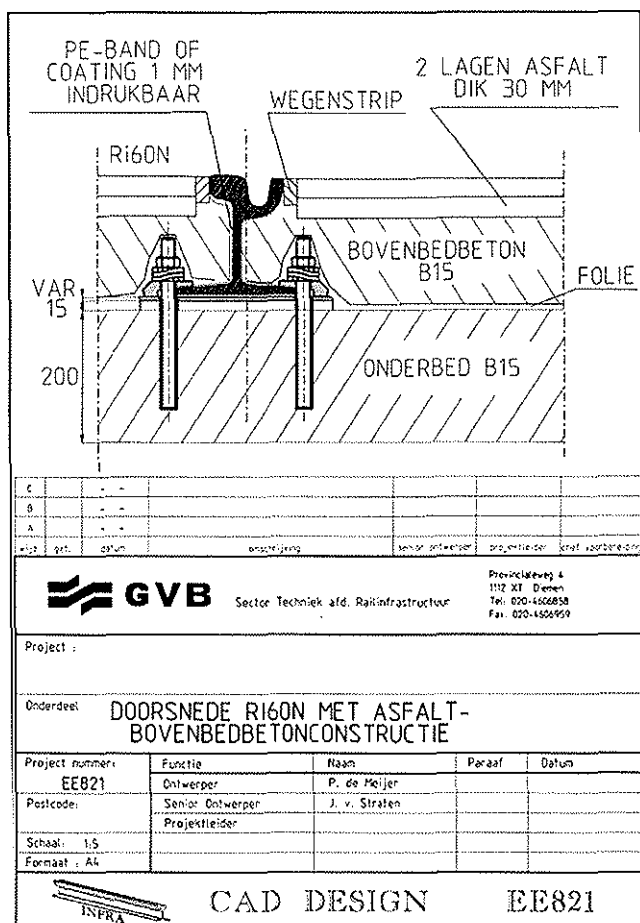
Literatuur

- [1.] Concept Reken- en Meetvoorschrift Railverkeerslawaaï 2004, Ministerie van VROM, 2004.
- [2.] Technische regeling emissiemeetmethoden Railverkeer 2004, Ministerie van VROM, 2004.
- [3.] Railruwheidsmetingen aan tramspoor GVB. Gerrit van Keulen, Bernard Lefranc. AEA Technology rapport nr. AEAT/05/50178/003, 2006
- [4.] Reken- en Meetvoorschrift Wegverkeerslawaaï 2002. , Ministerie van VROM, 2004.
- [5.] Geluidemissie Amsterdamse trams, Bepaling emissiegetallen conventionele tram 11/12G. Rik van Haaren, Harrie van Lieshout. DHV rapport MD-MO-2005xxx. 2006.
- [6.] Geluidemissie Amsterdamse trams, Mobiele meting Combino tram. Rik van Haaren, Erik van Bergen. DHV rapport MD-MO-2005xxx. 2006.

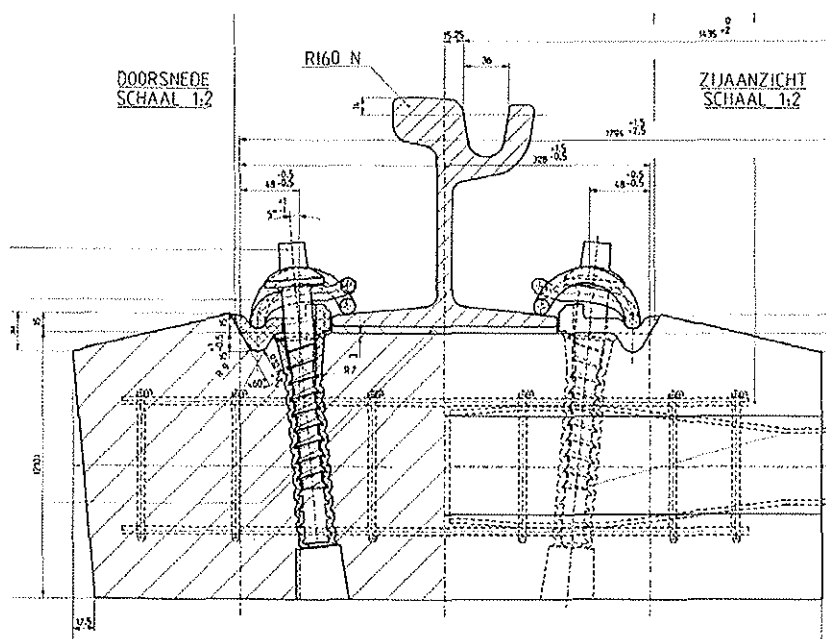
COLOFON

Opdrachtgever	: Dienst Milieu en Bouwtoezicht
Project	: Geluidsemissie Amsterdamse Trams
Dossier	: X1172
Omvang rapport	: 27 pagina's
Auteur	: Rik van Haaren en Harrie van Lieshout
Projectleider	: Rik van Haaren
Projectmanager	: Paul de Vos
Datum	: 22 december 2006
Naam/Paraaf	:

BIJLAGE 1: OVERZICHT SPOORBEVESTIGINGEN BIJ DE TYPEN BOVENBOUW

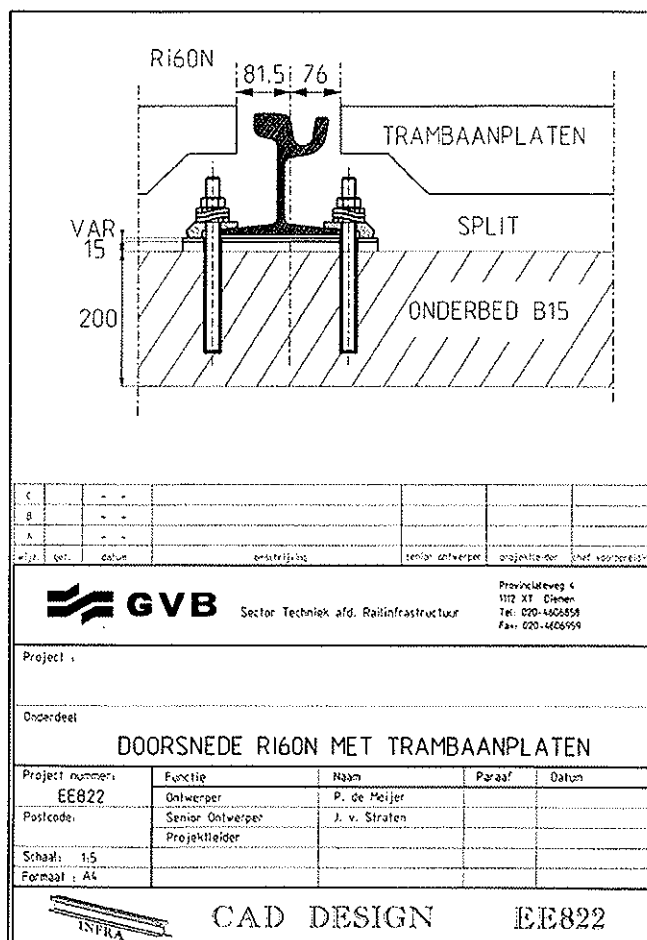


Figuur 1: Spoor in asfalt.



Figuur 2: Spoor op betonnen dwarsliggers in ballast

Opmerkingen: Spoor op een grasbaan heeft dezelfde montage als in figuur 2. De montage vindt plaats met Vossloh klemmen direct op een betonnen onderbed.

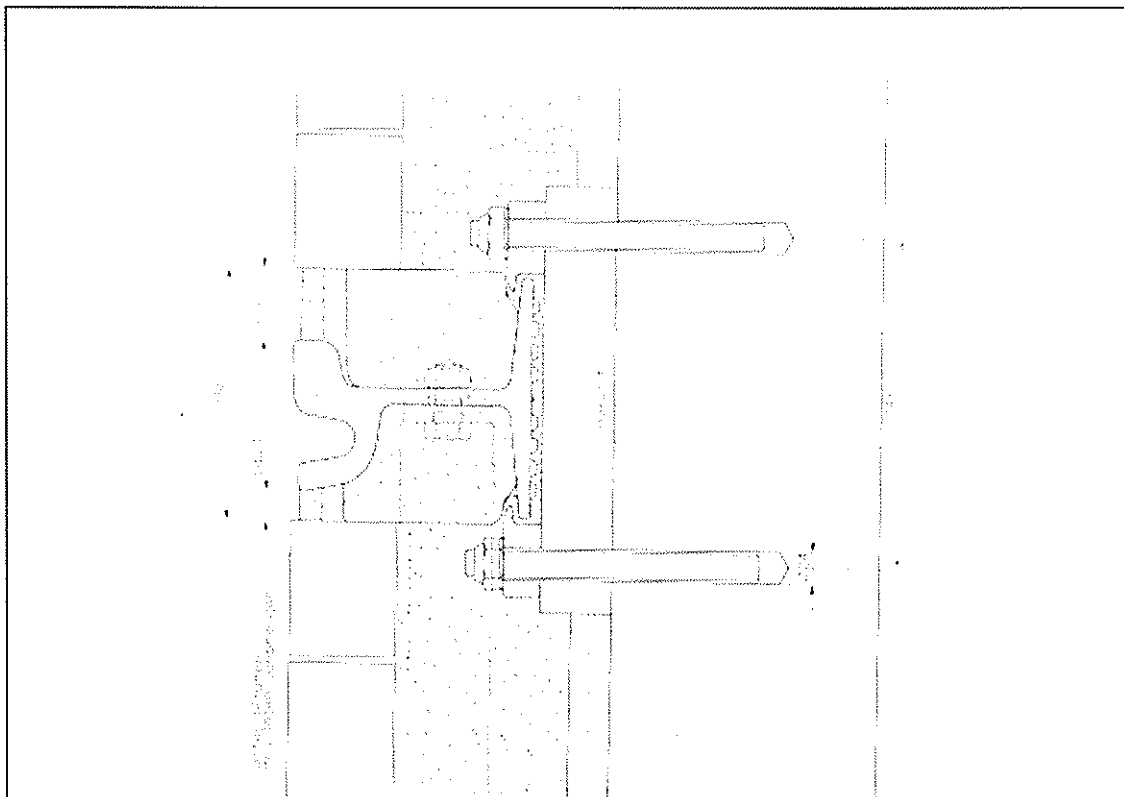


Figuur 3: Spoor met trambaanplaten.



Montage van zijprofielen op brug Herengracht 4 oktober 2000
Op maat zagen van de profielen 4 oktober 2000





Figuur 4: Spoor in klinkers (Ortec systeem)

Toelichting: Om de railvoet is een rubberprofiel aangebracht. Om de meter is de rail opgelegd op een hakorit blok en wordt met een speciale klem vast op de oplegging geklemd. Het rubber profiel wordt hierbij mee ingeklemd. De ziel van de rail wordt opgevuld met rubber profielen, waardoor een verticale afscheiding ontstaat tussen de rail- en de wegconstructie. Deze profielen kunnen de verticale beweging van de rail opvangen. De wegconstructie bestaat uit klinkers gelegd in een bed van brekerzand. De dwarsverbinding zijn eveneens ingepakt in een rubber profiel. De voegen tussen de railkop en de wegconstructie zijn gevuld met een speciaal voegmiddel.

BIJLAGE 2: BEPALING EMISSIEGETALLEN IN OCTAAFBANDEN

Voor de bepaling van de emissiegetallen in octaafbanden wordt uitgegaan van de methodiek zoals wordt gehanteerd in de reken en meetvoorschriften als bijlagen bij de Wet geluidhinder en nader zijn beschreven in Reken- en meetvoorschrift railverkeerslawaaï.

Het gebruik van de emissiegetallen dient wel conform de gebruikelijke modellering voor wegverkeer plaats te vinden, waarbij de (monopool) bron zich op wegdekhoogte (railhoogte) bevindt.

De verzamelterm voor de overdracht is gedefinieerd als:

$$\overline{\Delta L_i} = 10 \lg \left(\frac{1}{25} \sum_{k=-12}^{k=12} 10^{(D_{L,i} + D_{B,i} - \Delta L_{GU}(\Phi_k))/10} \right) + 58,6$$

met

Φ_k = bijv. 5° (totale openingshoek $25 \cdot 5^\circ = 125^\circ$)

D_L = de verwakking door absorptie in lucht volgens ORM;

D_B = de bodemdemping volgens ORM;

ΔL_{GU} = de geometrische uitbreiding volgens ORM.

De berekening van ΔL_{GU} verloopt voor een monopool uitbreiding als volgt:

$$\Delta L_{GU} = 10 \lg \frac{\phi}{r \sin \nu}$$

Tabel bijlage 2.1: Overdrachtscorrecties

Frequentie [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Ballastspoor	0	-0,4	-0,8	-1	-0,5	-0,3	-0,3	-0,3
Grasbaan	0	-1,8	-4,5	-5,1	-2,8	-1,6	-1,6	-1,7
Klinkers/asfalt/trambaanplaten	0	-2,2	-5,4	-6,3	-3,3	-2	-2	-2

De overdrachtcorrectie in tabel 2.1 levert een minimale correctie voor ballastspoor, als gevolg van de absorptie van het ballastbed. Voor situaties met klinkers, asfalt en de tramplaten is de correctie maximaal als gevolg van de reflecties op de harde grond. De gemeten geluidimmissie wordt verminderd met de bijdragen van de reflecties op die harde ondergrond. De grasbaan heeft een beperkte reflectiebijdrage die moet worden gecorrigeerd.