

Maatregelen booggeluid railverkeer

Rapport 03-03

CROW is het nationale kenniscentrum voor verkeer, vervoer en infrastructuur. In deze non-profit organisatie werken Rijk, provincies, gemeenten, aannemersorganisaties, adviesbureaus, openbaarvervoerorganisaties en onderwijsinstellingen samen vanuit hun gemeenschappelijke belangen bij ontwerp, aanleg en beheer van wegen en verkeers- en vervoersvoorzieningen. Actief in onderzoek op het gebied van grond-, wegenbouw, verkeer en vervoer, en regelgeving in de grond-, water- en wegenbouw, ontwikkelt CROW breed gedragen kennisproducten. Daarbij richt CROW zich op een ruime verspreiding onder alle doelgroepen. Een voorbeeld van kennisverspreiding op internationale schaal is de participatie van CROW in de databank van ITRD (International Transport and Research Documentation). Deze databank is via CROW te raadplegen.

Disclaimer

CROW is een onafhankelijke organisatie die kennis wil verspreiden over verkeer, vervoer en infrastructuur. CROW heeft geen mening of doet geen aanbevelingen over producten of leveranciers. Merknamen of de namen van leveranciers komen alleen voor in dit rapport omdat het noodzakelijk is voor de duidelijkheid en volledigheid. Aan de vermelding mogen geen rechten, voor- of nadelig, worden ontleend.

Auteursrecht

De inhoud van dit rapport valt onder bescherming van de auteurswet. De auteursrechten berusten bij CROW.

CROW

Galvanistraat 1, 6716 AE Ede
Postbus 37, 6710 BA Ede
Telefoon (0318) 69 53 00
Fax (0318) 62 11 12
E-mail crow@crow.nl
Website www.crow.nl

Woord vooraf

In Nederland zijn de probleemeigenaren van booggeluid, veroorzaakt door spoorwegen of tram- en metrobanen, zich bewust geworden dat een gezamenlijke aanpak van de geluidsproblemen tot een vruchtbaar resultaat kan leiden. De betrokken vervoersmaatschappijen zijn daartoe vanaf medio 1999 onder begeleiding van CROW gaan samenwerken op het gebied van kennis, mankracht en financiële middelen en hebben vervolgens een onderzoeksproject Booggeluid ingericht. Vóór die tijd werd het probleem booggeluid vooral via de ‘trial and error-methode’ aangepakt. Gedurende het onderzoek zijn alle mogelijke maatregelen tegen booggeluid de revue gepasseerd of zijn onderzocht in laboratorium of onder praktijkomstandigheden. Het onderzoeksresultaat komt tot uiting in een lijst met gevalideerde technische maatregelen waardoor het optreden van booggeluid bij, op rails voortbewegende voertuigen, sterk kan worden verminderd of zelfs opgeheven. Van de meest kansrijke alternatieven zijn prototypen ontwikkeld die in werkelijke praktijksituaties zijn ingebouwd en gemeten op de productie van booggeluid. De beheerders van railinfrastructuur beschikken als eindresultaat over een pakket geteste maatregelen waarmee booggeluid kan worden bestreden.

Het project is formeel ondergebracht bij de CROW-coördinatiecommissie Railbouwkunde. De organisatie van het project Booggeluid, zoals het bij CROW te boek staat, is tweeledig geweest. Enerzijds is er een projectgroep Booggeluid waarin de financiers en opdrachtgevers vertegenwoordigd zijn en daarnaast is er de technische begeleidingscommissie Paraboog met vertegenwoordigers van alle marktpartijen die betrokken kunnen zijn bij de bestrijding van booggeluid van railverkeer.

De taakstelling in het project booggeluid luidt: Het opstellen van een lijst met gevalideerde technische maatregelen die het optreden van booggeluid bij voertuigen, die zich voortbewegen op rails, sterk verminderen of zelfs voorkomen.

De projectgroep is in oktober 1999 voor het eerst bijeengekomen. Daarbij zijn uitgebreide afspraken gemaakt over de organisatie van het project, de onderlinge verantwoordelijkheden en de rolverdeling. Ook is met de opdrachtnemende bureaus een tijdschema afgesproken voor het uitvoeren van de zeven fasen waaruit dit deel van het onderzoek is opgebouwd.

Vanaf diezelfde tijd heeft de technische begeleidingscommissie Paraboog zich toegelegd op de technische begeleiding tijdens de uitvoering van de fasen en de inhoudelijke beoordeling van de resultaten die per fase zijn opgeleverd.

Uiteindelijk is een totaalplan met tien fasen van onderzoek voor het vinden van oplossingen voor het terugdringen van booggeluid bij railvervoer gedefinieerd. De begeleidingscommissie heeft zich ook bezig gehouden met het officieel afnemen van de rapportages over de eerste drie fasen van het project Booggeluid. Deze rapportages zijn tot stand gekomen in opdracht van en met financiële middelen van het ministerie van VROM, ze vormen de basis voor de uitvoering van de overige zeven fasen in dit project. Voor de resterende zeven fasen hebben Railinfrabeheer (RIB), HTM, RET en GVB-A met CROW een consortium gevormd voor de verdere uitvoering.

Het onderzoek is afgesloten met deze samenvattende CROW-rapportage die het project afrondt met praktische aanbevelingen en combinaties van te nemen van maatregelen die booggeluid kunnen terugdringen. Hierin zijn tevens de ervaringen van maatregelen opgenomen die tot nu toe in de praktijk zijn toegepast.

Met dit samenvattende rapport over Booggeluid dat een aantal oplossingsrichtingen aangeeft en als naslagwerk kan dienen wil CROW de vervoersbedrijven, beheerders van railinfrastructuur, ingenieurs- en adviesbureaus, milieudiensten en aannemers behulpzaam zijn bij het bedenken van oplossingen voor booggeluid. De samenstellers van dit rapport hebben zo goed en volledig mogelijk de laatste stand der techniek willen weergeven. Daarnaast zijn er ook aanbevelingen geformuleerd voor verdere verbeteringen van geluidsreducerende maatregelen bij spoorconstructies.

De directie van CROW is de personen die aan het totstandkomen van dit eindproduct hebben meegewerkt zeer erkentelijk voor hun bijdragen aan dit CROW-rapport, te weten:

Projectgroep Booggeluid:

- CROW (vanaf 2001 A.J. van Leest, tot 2001 J.J.M. van der Vring)
- GVB-A (vanaf 2001 J. Quak, tot 2001 A.J. Visser)
- HTM (R.J. van Soest)
- RET (H.C. van der Meij)
- RIB (vanaf 2001 M.G.M. van Schaik, tot 2001 mevr. C.M. Kootwijk-Damman)
- Railinfrabeheer (F.S. Lizzo, administrateur)

Technische begeleidingscommissie Paraboog:

- CROW (vanaf 2001 A.J. van Leest, tot 2001 J.J.M. van der Vring)
- GVB-A (vanaf 2001 J. Quak, tot 2001 A.J. Visser)
- HTM (R.J. van Soest)
- RET (H.C. van der Meij)
- Railinfrabeheer (vanaf 2001 M.G.M. van Schaik, tot 2001 mevr. C.M. Kootwijk-Damman)
- Ministerie van VROM (B.J.F. Kortbeek)
- Holland Railconsult (Ph.H.van den Dool en B. Paanakker)
- DGMR Raadgevende Ingenieurs (J.J.A. van Leeuwen)
- Namens Railinfrabeheer (W. Wei, vanaf 2001)
- AEA Technology Rail (E. van Haaren en mevr. S. Janssen, notuliste)
- NedTrain Consulting (J.J. Weener)
- Novem (A. Brouwer)
- TNO-TPD (F.G. de Beer)

De begeleiding vanuit CROW werd verzorgd door ir. A.J. van Leest. Het onderzoek en de rapportage hiervan is, met medewerking van de technische begeleidingscommissie, inhoudelijk opgezet en uitgewerkt door de bureaus AEA Technology Rail, NedTrain Consulting en TNO-TPD.

Participanten en financiers in het onderzoek zijn Railinfrabeheer, CROW, HTM, RET en GVB-A. Een belangrijke subsidie is verkregen vanuit het Ministerie van Economische Zaken, via Senter.

De directie CROW is er van overtuigd dat met dit rapport voor vervoerders over rail en ontwerpers, beheerders, adviseurs en uitvoerders van railinfrastructuur een nuttig en bruikbaar gereedschap beschikbaar is gekomen.

Zonder het enthousiasme en de inzet van de werkgroepleden en andere betrokkenen zou het voorliggende resultaat niet tot stand zijn gekomen. Daarom spreek ik op deze plaats graag een woord van dank uit aan iedereen die heeft bijgedragen aan de voorliggende rapportage.

CROW

dr. ir. I.W. Koster, directeur

Inhoud

Samenvatting 7

- 1 Inleiding 8**
- 2 Onderzoeksopzet 9**
 - 2.1 Inleiding 9
 - 2.2 Doelstelling onderzoek 9
 - 2.3 Onderzoeksaspecten 9
- 3 Resultaten fase 1 tot en met 3 10**
 - 3.1 Evaluatie Squeal 10
 - 3.2 Literatuuronderzoek 10
 - 3.3 Meetmethodiek 10
- 4 Maatregelen 11**
 - 4.1 Aanpak 11
 - 4.2 1^o Selectieronde maatregelen 11
 - 4.3 2^o Selectieronde maatregelen 12
 - 4.4 Prototype maatregelen 13
 - 4.4.1 Wioldempers 13
 - 4.4.2 Wijzigen van de wrijving in het wiel-rail contact 14
 - 4.4.3 Asymmetrisch spoorstaafprofiel en spoorwijdte aanpassing 15
 - 4.4.4 Wijzigen materiaal wiel of rail 16
 - 4.5 Conclusies 17
- 5 Modelling 18**
 - 5.1 Inleiding 18
 - 5.2 Algemene beschrijving van opwekkingsmechanismen 19
 - 5.3 Wrijvingscoëfficiënt 19
 - 5.4 Booggeluid door instabiele laterale slip 20
 - 5.5 Booggeluid door andere opwekkingsmechanismen 24
 - 5.6 Ranking van maatregelen 24
 - 5.7 Conclusies modellering 25
- 6 Laboratoriummetingen 26**
 - 6.1 Inleiding 26
 - 6.2 Beschrijving van de testbank 26
 - 6.3 Validatiemetingen 27
 - 6.4 Metingen aan maatregelen 27
 - 6.5 Conclusies laboratoriummetingen 32
- 7 Volle schaal metingen 33**
 - 7.1 Asymmetrisch railprofiel 33
 - 7.2 Verende wielen 34
 - 7.3 Wijzigen wrijvingsgedrag 35
 - 7.4 Wiel en raildempers 36
 - 7.4.1 Metingen wioldempers 36
 - 7.4.2 Metingen raildempers 38
 - 7.5 Overige nuttige bevindingen 38
 - 7.6 Samenvatting resultaten veldmetingen 39
- 8 Conclusies 40**

9 Aanbevelingen 42

Literatuur 44

Bijlage I Beschrijving maatregelen 45

Samenvatting

In de periode 1999-2002 hebben de onderzoekspartijen TNO-TPD, AEA TR en NedTrain Consulting het project 'Onderzoeksprogramma Booggeluid' uitgevoerd. Dit project is uitgevoerd in opdracht van een consortium bestaande uit CROW, RIB, GVB-A, HTM en RET en is mede mogelijk gemaakt door een BTS-subsidie (Bedrijfsgerichte Technologische Samenwerkingsprojecten) van SENTER, het economisch agentschap van het Ministerie van Economische Zaken.

In dit project is onderzoek gedaan naar de ontstaansmechanismen van booggeluid en maatregelen om booggeluid te reduceren. Onder booggeluid wordt in het kader van dit project verstaan het hoogfrequente piepen en krijsen dat een railgebonden voertuig (trein, tram of metro) soms maakt bij het doorlopen van een (wissel)boog. Booggeluid veroorzaakt geluidshinder dat vooral optreedt langs tramlijnen, op emplacementen en op de vrije baan bij stationsomgevingen. In omgevingen waar booggeluid het meest voorkomt is de concentratie van woningen relatief hoog; hierdoor is het aantal gehinderden door booggeluid groot.

Booggeluid kan worden voorkomen door aanpassingen in de spoorgeometrie. Bij praktijkmetingen is vastgesteld dat spoorwijdtevernauwing en het aanbrengen van een asymmetrisch spoorstaafprofiel zeer effectief is. Aanpassingen in de spoorgeometrie bieden mogelijk ook kansen om flensgeluid te beperken. De verwachting is dat deze maatregelen zeer kosteneffectief zijn, zeker ten opzichte van materieelgebonden maatregelen. Wel staat de toepassing van deze maatregelen nog in de kinderschoenen; er is nog geen optimaal spoorstaafprofiel bepaald en zijn lange termijn effecten als de slijtvastheid nog niet bekend. Verder onderzoek zou zich ook op deze aspecten moeten richten.

Wieldempers kunnen op basis van andere ervaringen significante reducties geven, in de praktijktesten trad echter te weinig booggeluid op om dit te kunnen vaststellen. Het blijft echter een hoopgevende maatregel, waarvan aanbevolen wordt om deze verder te onderzoeken.

Beproevingen met frictieverbetersaars beperken in principe booggeluid, maar laten een wisselend beeld zien. Voordeel van toepassing van frictieverbetersaars is dat in combinatie met wielflenssmering er al veel praktijkervaring is. Frictieverbetersaars en wielflenssmering kunnen aangebracht worden middels een mobiele installatie of een baaninstallatie.

Voor het project zijn een rekenmodel en een testbank ontwikkeld. Deze onderzoeksaanpak heeft geleid tot goed inzicht in het mechanisme van booggeluid, met name stick-slip. Zo is voor het eerst vastgesteld dat de locatie van het contactpunt en de mate van laterale slip in sterke mate bepalend zijn voor het al dan niet optreden van booggeluid. Deze parameters zijn te beïnvloeden door aanpassingen in de spoorgeometrie, en bieden mogelijkheden om booggeluid te elimineren. Zowel het rekenmodel als de testbank is momenteel alleen nog geschikt voor het voorspellen van de effecten van laterale slip, voor flenseffecten moet zowel het model als de testbank uitgebreid worden.

1 Inleiding

In dit project is onderzoek gedaan naar de ontstaansmechanismen van booggeluid en maatregelen om booggeluid te reduceren. Onder booggeluid wordt in het kader van dit project verstaan het hoogfrequente piepen en krijsen dat een railgebonden voertuig (trein, tram of metro) soms maakt bij het doorlopen van een (wissel)boog. Booggeluid veroorzaakt geluidshinder dat vooral optreedt langs tramlijnen, op emplacementen en op de vrije baan bij stationsomgevingen. In omgevingen waar booggeluid het meest voorkomt is de concentratie van woningen relatief hoog; hierdoor is het aantal gehinderden door booggeluid groot.

Het belang van het begrijpen en het vervolgens op praktische wijze kunnen oplossen van booggeluid is groot, zowel wat de kostenfactor als de intensiveringmogelijkheden van railtransport betreft. De probleemeigenaren zoals RIB, GVB-A, HTM en RET besteden jaarlijks grote bedragen aan het op een aanvaardbaar niveau brengen en houden van booggeluid. Daarnaast beperkt de geluidshinder de intensivering of uitbreiding van railvervoer in met name stedelijke gebieden. CROW heeft als overkoepelende organisatie onder meer als taak studies uit te voeren om transportproblemen te helpen oplossen.

De doelstellingen van het project zijn tweeledig. De eerste doelstelling is gericht op kennisontwikkeling van het ontstaansmechanisme van booggeluid (theoretische component), de tweede op het vergaren van kennis over de werking van booggeluidsreducerende maatregelen (praktische component). De scope van het onderzoek is gericht op trein-, tram- en metrosystemen.

Het project 'Onderzoeksprogramma Booggeluid' is gestart met een initialisatie fase. AEA TR en TNO hebben in opdracht van het Ministerie van VROM de fasen 1 tot en met 3 uitgevoerd, voordat het onderhavige onderzoek is uitgevoerd. Dit rapport beschrijft de fasen 4 tot en met 10 van het project, op de voorgaande fasen wordt slechts summier ingegaan.

Dit rapport kent de volgende indeling. In hoofdstuk 2 wordt nader ingegaan op de opzet en de doelstellingen van het onderzoeksprogramma. Hoofdstuk 3 geeft een korte omschrijving van de fasen 1 tot en met 3 van het onderzoek. De hoofdstukken 4 tot en met 7 beschrijven respectievelijk de maatregelen, de modellering van het booggeluid, de laboratoriummetingen en de veldmetingen. (gezamenlijk de fasen 4 tot en met 10 van het onderzoek). Het rapport wordt afgesloten met de conclusies van het onderzoek in hoofdstuk 8 en de aanbevelingen voor vervolgonderzoek in hoofdstuk 9.

2 Onderzoeksopzet

2.1 Inleiding

Onderzoek naar booggeluid is zowel bij tram-, metro- als spoorwegaanschappijen de laatste jaren goed op gang gekomen. Tussen de bestaande theorieën en de praktijk is echter nog steeds een kloof aanwezig, hetgeen aangeeft dat een fundamentele aanpak van dit probleem noodzakelijk is. Daarom is het project 'Onderzoeksprogramma Booggeluid' opgezet.

2.2 Doelstelling onderzoek

Het onderzoeksprogramma omvat zowel theoretisch als praktisch onderzoek. Het onderzoeksprogramma is gericht op kennisontwikkeling van het ontstaansmechanisme van booggeluid en de werking van geluidsreducerende maatregelen voor zowel tram-, metro- als treinsystemen.

De doelstelling van het theoretische onderzoek is de ontwikkeling van een model waarmee antwoord te geven is op onderstaande vragen:

- Wanneer treedt booggeluid op?
- Als booggeluid optreedt, wat is dan het niveau?
- Welke nog ontbrekende invloedsfactoren zijn relevant?
- Wat zijn goede en relevante experimenten?
- Hoe kan het effect van maatregelen tegen booggeluid gemeten worden?

De doelstelling van het praktisch onderzoek is om een lijst van maatregelen tegen booggeluid te genereren waarvan bekend is:

- waarom ze werken;
- wat het geluidsreducerend effect is;
- hoe het effect te beïnvloeden is;
- wat de kosten, levensduur en andere relevante aspecten zijn.

2.3 Onderzoeksaspecten

Het onderzoeksprogramma is gebaseerd op onderstaande fasering, waarbij een duidelijk onderscheid is gemaakt tussen activiteiten die nodig zijn voor vergroting van de begripsvorming omtrent booggeluid, waaronder modelvorming, en de activiteiten die te maken hebben met het genereren en testen van praktische oplossingen voor booggeluid.

<i>Fase</i>	<i>Deelproject</i>	<i>Uitvoerder</i>	<i>Opmerking</i>
1	Evaluatie SQUEAL, model Périard	TNO-TPD	valt buiten dit onderzoeksprogramma
2	Opstellen literatuurlijst	AEA TR	valt buiten dit onderzoeksprogramma
3	Opstellen meetmethodiek	AEA TR	valt buiten dit onderzoeksprogramma
4	Inventarisatie kansrijke maatregelen	NTC	
5	Modellering van booggeluid	TNO-TPD	
6	Laboratoriumbeproeving	TNO-TPD	
7	Volle schaal proeven	AEA TR	
8	Opstellen maatregelenlijst	NTC	
9	Ontwikkeling prototypen	NTC	
10	Beproeving maatregelen	AEA TR	

3 Resultaten fase 1 tot en met 3

Het ‘Onderzoeksprogramma Booggeluid’ is gestart met een initialisatie fase. Deze fase is onderverdeeld in de volgende onderdelen:

- 1 evalueren van het bestaande booggeluidmodel ‘SQUEAL’;
- 2 literatuuronderzoek nationale en internationale projecten op het gebied van booggeluid;
- 3 opstellen van een meetmethodiek.

De resultaten van de initialisatie fase hebben als uitgangspunt gefungeerd voor de vervolgfases in het ‘Onderzoeksprogramma Booggeluid’. De initialisatie fase is afgerond in 1999. Dit hoofdstuk beschrijft in het kort bovengenoemde fasen [1].

3.1 Evaluatie Squeal

‘SQUEAL’ is een model, ontwikkeld door F. Périard aan de TU Delft, dat het optreden van booggeluid kan simuleren. Het model is echter niet door hem gevalideerd. Binnen het ‘Onderzoeksprogramma Booggeluid’ is het model daarom geëvalueerd. Uit deze evaluatie blijkt dat het model geen betrouwbare resultaten oplevert. Het is mogelijk het model te verbeteren, maar er is besloten dat het efficiënter was om een alternatief model te ontwikkelen. Dit alternatieve model berust op het samenvoegen van drie gevalideerde softwarepakketten: ‘SIMPACT’ voor voertuigdynamica, ‘TWINS’ voor wiel-rail-dynamica en geluidsafstraling en ‘CONTACT’ voor contactmechanica. Door gebruik te maken van gevalideerde software hoeft alleen de interactiemodule dan nog ontwikkeld en gevalideerd te worden.

3.2 Literatuuronderzoek

Van een drietal voorgestelde ontstaansmechanismen van booggeluid is laterale slip de meest waarschijnlijke. Hierover bestaat in recente literatuur alsmede bij de geraadpleegde specialisten een hoge mate van consensus. Laterale slip van het wiel is een zijdelingse slip-stick beweging bij het doorlopen van de boog. Het is niet uitgesloten dat naast laterale slip ook flenswrijving een rol speelt bij booggeluid. Derhalve werd besloten beide mechanismen nader te onderzoeken.

Meetcampagnes voor Nederlandse trammaatschappijen, ter evaluatie van maatregelen tegen booggeluid, hebben in het verleden geen heldere resultaten opgeleverd. Ook uit buitenlands onderzoek komen geen eenduidige oplossingen naar voren. Voor een belangrijk deel is dit uitblijven van succes te wijten aan gebrek aan kennis over het ontstaansmechanisme en over invloedrijke parameters. Hierdoor is het mogelijk dat in het verleden diverse praktijkproeven verstoord werden door (niet gecontroleerde) wijziging van parameters die een even grote, of grotere invloed hebben op booggeluid dan de te evalueren maatregelen.

3.3 Meetmethodiek

Om meer grip te krijgen op het fenomeen booggeluid is een systematische aanpak in het onderzoek noodzakelijk. De basis hiervoor wordt gegeven door een drietal meetprotocollen die in verschillende situaties en voor verschillende doeleinden kunnen worden gevolgd. Deze meetprotocollen maken gebruik van een parameterlijst die speciaal hiervoor is samengesteld uit in de literatuur genoemde en onderzochte parameters, en interviews met specialisten. Deze lijst is ingedeeld in negen baanparameters, zestien voertuigparameters, vier meteorologische parameters en drie interactie parameters. In de drie meetprotocollen, die onderling in doel, opzet en omvang verschillen, worden deze parameters in meer of mindere mate gemeten. De eenvoudige meting stelt vast óf er booggeluid optreedt en in welke mate dit gebeurt. De standaardmeting stelt de invloed van verschillende parameters vast, hetgeen een goede vergelijking tussen verschillende situaties mogelijk maakt. De uitgebreide meting onderzoekt de invloed van alle parameters, opdat een uitvoerig en diepgaand onderzoek naar het optreden van booggeluid mogelijk wordt.

4 Maatregelen

Dit hoofdstuk beschrijft de maatregelen die in het project zijn geïnventariseerd en verder zijn doorontwikkeld voor beproeving. In fase 4 van het onderzoek zijn alle mogelijke kansrijke maatregelen geïnventariseerd, in fase 8 is na de 1^e beproevingsronde een beperkt aantal maatregelen geselecteerd voor een meer uitgebreide beproeving. Fase 9 gaat over het bouwen van prototypen van maatregelen voor deze beproeving. Voor meer informatie wordt verwezen naar de achterliggende rapporten [2, 3 en 4].

4.1 Aanpak

Tijdens deze fase is een inventarisatie van maatregelen tegen booggeluid uitgevoerd. Er zijn 21 maatregelen geselecteerd, waarvan in meer of mindere mate praktijkgegevens zijn. Hiervoor is in de literatuur gedoken en zijn deskundigen in binnen- en buitenland geraadpleegd. Per maatregel is onderzocht welke geluidsreductie deze teweeg kan brengen, welke voor- en nadelen eraan verbonden zijn en welke kosten de maatregel met zich mee brengt. Het is echter gebleken dat van de meeste maatregelen het kostenplaatje niet goed bekend is. Er zijn geen verrassende nieuwe maatregelen gevonden, alle maatregelen waren min of meer al bekend. Wel is er veel extra informatie over de al bekende maatregelen verzameld.

Om tot een keuze te komen voor een aantal maatregelen is twee keer een besluitvormingsanalyse uitgevoerd in samenwerking met de begeleidingscommissie. De maatregelen zijn hierbij beoordeeld aan de hand van drie belangrijke criteria:

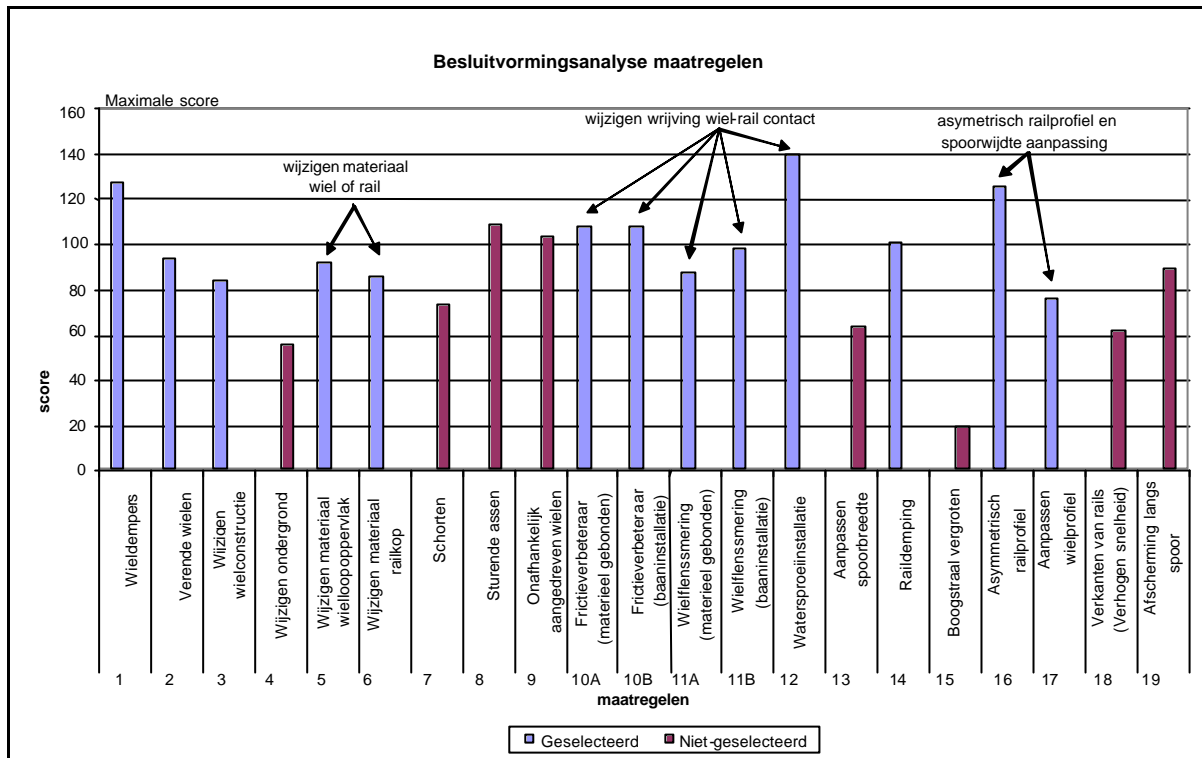
- Geluidsreductie L_{Amax} .
- Life Cycle Costs.
- Praktijkervaring / Technische haalbaarheid.

Deze drie criteria vertegenwoordigen de drie belangrijkste aspecten: Effect, kosten en kans op succes.

De eerste keer dat een besluitvormingsanalyse is uitgevoerd is na de inventarisatie van de maatregelen geweest om maatregelen te selecteren voor de 1^e beproevingsronde. Op basis van de ervaringen en resultaten van deze beproevingen is voor een 2^e keer een besluitvormingsanalyse uitgevoerd om maatregelen te selecteren voor de uitgebreide beproevingen.

4.2 1^e Selectieronde maatregelen

De 1^e besluitvormingsanalyse van de maatregelen heeft de volgende score opgeleverd.



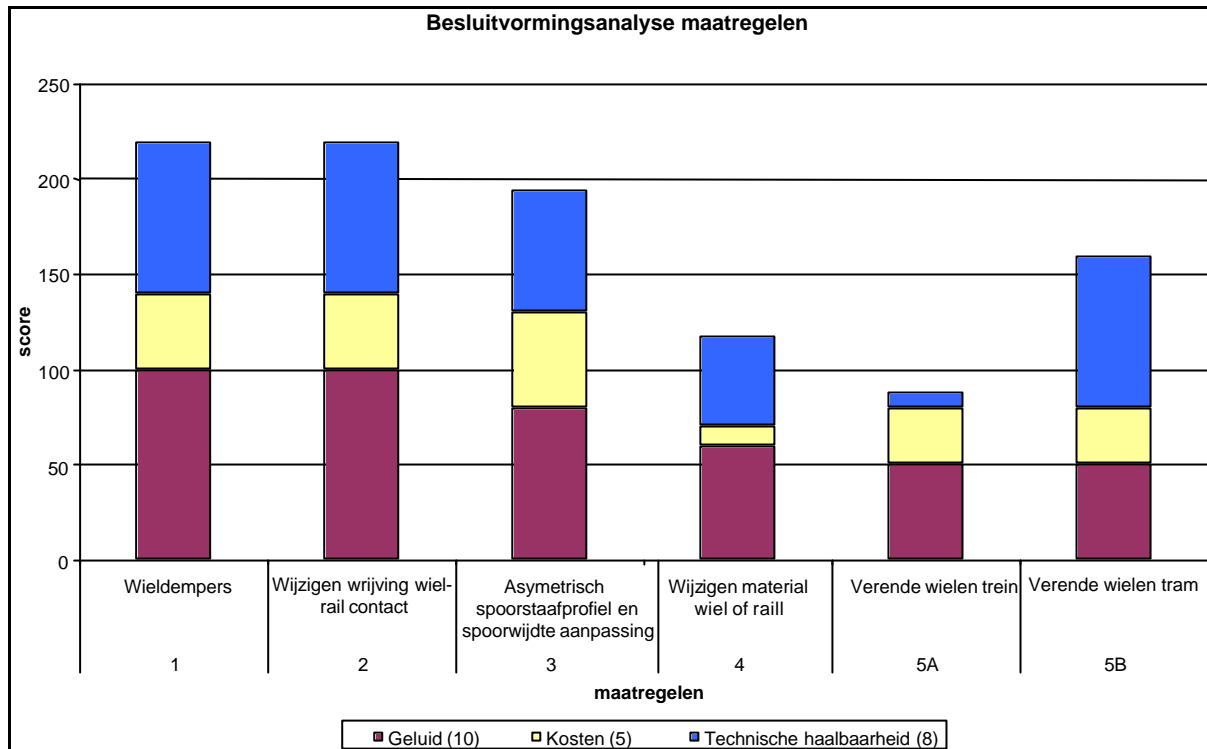
Figuur 1. 1^e besluitvormingsanalyse maatregelen

De in blauw aangegeven maatregelen zijn geselecteerd voor modelberekeningen, laboratoriumbeproevingen en/of volle schaalmetingen. Zoals aangegeven in figuur 1 zijn een aantal maatregelen geclusterd voor beproevingen.

Meer informatie over genoemde maatregelen staat weergegeven in bijlage I.

4.3 2^e Selectieronde maatregelen

Na de 1^e ronde van de beproevingen is de besluitvormingsanalyse opnieuw uitgevoerd (zie figuur 2). Hierbij is gebruik gemaakt van de ervaringen uit deze eerste beproevingsfase. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de maatregelen ‘radstand verkleinen’, ‘raildemping’, ‘wijzigen wielconstructie’ en ‘aanpassen wielprofiel’ niet meegenomen zijn vanwege de slechte scores in de modelleringsfase.



Figuur 2. 2^e besluitvormingsanalyse maatregelen

Het onderscheid tussen trein en tram bij de maatregel 'Verende wielen' is terug te voeren op het treinongeluk bij Eschede (Duitsland) waarbij de wielband van een verend wiel afliiep. Hierdoor is de score op technische haalbaarheid voor treinen laag inschat. Besloten is om de volgende maatregelen te beproeven:

- 1 wioldempers;
- 2 wijzigen wrijving wielrail contact;
- 3 asymmetrisch spoorstaafprofiel en spoorwijdte aanpassing;
- 4 wijzigen materiaal wiel of rail.

4.4 Prototype maatregelen

In deze paragraaf worden de maatregelen besproken waar prototypen van zijn gemaakt. Deze prototypen worden eveneens besproken. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt voor toepassing op tram of trein (metro).

4.4.1 Wioldempers

Ten behoeve van de trein

Voor de beproeving op de trein zijn een aantal wioldempers geselecteerd:

- Bonatrans plaatdemper.
- ENAC ringdemper (zie foto 1).
- Valdunes ringdemper.
- BVV axiale sandwich damper (zie foto 2).
- Heathcote gelijmde demper.



Foto 1. BVV axiale demper

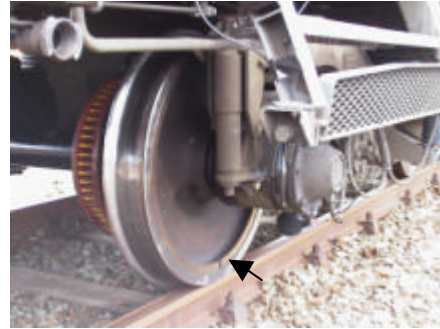
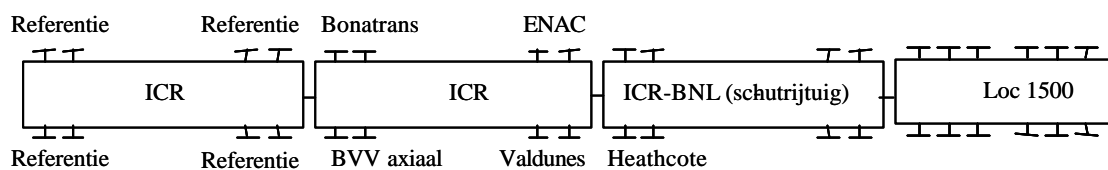


Foto 2. ENAC ringdemper

De wioldempers zijn op de onderstaande manier op een tweetal ICR-treinstellen gemonteerd.



Figuur 3. Proefopzet wioldempers

Ten behoeve van de tram

Het uitvoeren van een proef met wioldempers op trammaterieel is helaas niet haalbaar gebleken, vanwege de verende wielen op een tram. Voor het monteren van wioldempers op verende wielen is meer technisch onderzoek nodig om de veiligheid van het wiel te kunnen garanderen. De leveranciers van de wioldempers konden of wilden geen garanties geven.

4.4.2 Wijzigen van de wrijving in het wiel-rail contact

Ten behoeve van de trein

Het aanbrengen van frictieverbeteraar en wielflensmeermiddel is een beproefd middel om de wrijving in het wiel-rail contact te verbeteren. Frictieverbeteraar is een middel (vetachtig) waarmee de wrijving op een constant niveau gehouden kan worden, waardoor geen stick-slip meer kan optreden. Voor het emplacement Watergraafsmeer is een mobiele doseerinstallatie ontwikkeld waarmee dagelijks de frictieverbeteraar Headlub op de kop van de spoorstaaf en het wielflensmeermiddel Kajo Bio op de flens wordt aangebracht.



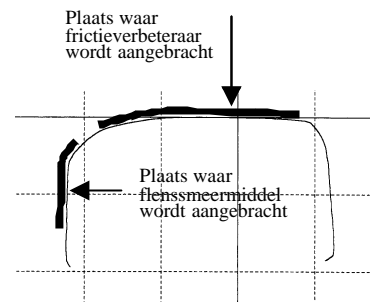
Foto 3. Mobiele doseerinstallatie op het emplacement Amsterdam Watergraafsmeer

Ten behoeve van de tram

Voor de tram is een soortgelijk systeem ontwikkeld als voor de trein. Een mobiele doseerinstallatie is op een smeewagen van de HTM gemonteerd (zie figuur 4a).



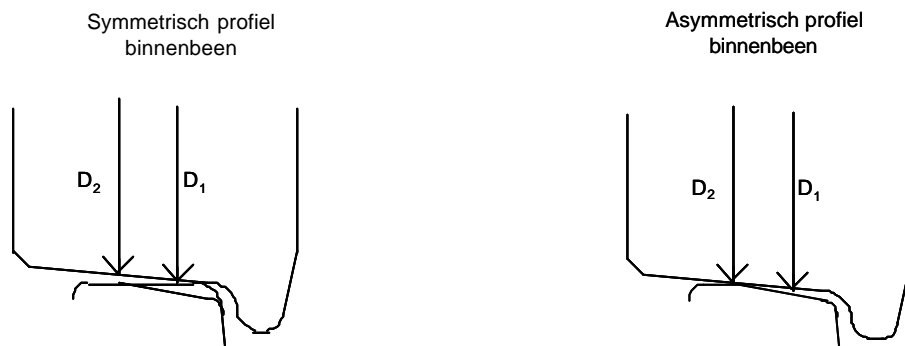
Foto 4a. Smitmond om frictieverbeteraar op spoorstaafkop te spuiten



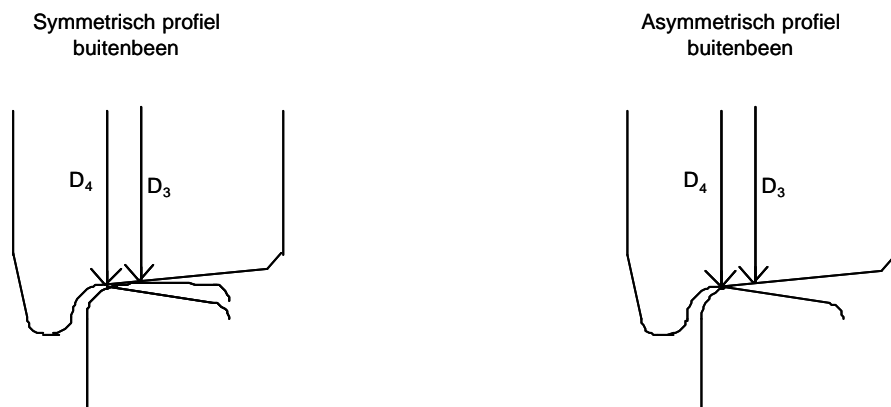
Figuur 4b. Plaats waar flensmeermiddel en frictieverbeteraar wordt aangebracht

4.4.3 *Asymmetrisch spoorstaafprofiel en spoorwijdte aanpassing*

Door het aanbrengen van een asymmetrisch profiel kan er voor worden gezorgd dat op het binnenbeen de contactpositie van het wiel op de kop van de spoorstaaf van de flenszijde af gaat. Hierdoor wordt het verschil in afrol diameter tussen het binnen- en buitenwiel vergroot, waardoor het stick-slip effect afneemt. Dit wordt in figuur 5 verduidelijkt. Een asymmetrisch profiel op het binnenbeen (figuur 5) verplaatst de contactpositie waardoor de afrol diameter van D_1 naar D_2 wordt verkleind. In figuur 6 is een asymmetrisch profiel aangebracht op het buitenbeen. Hierdoor wordt de afrol diameter vergroot van D_3 naar D_4 .



Figuur 5. Verschuiving contactpositie binnenbeen bij aanbrengen asymmetrisch profiel

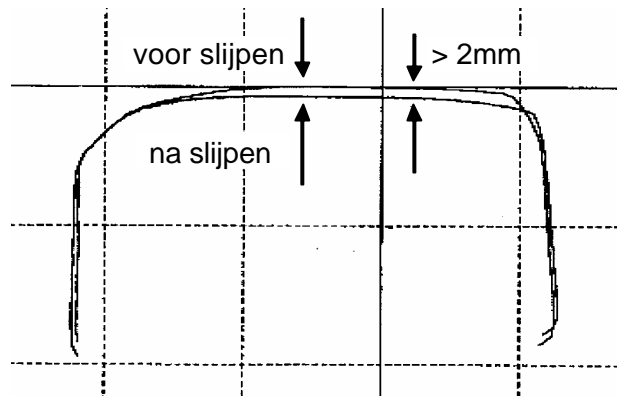


Figuur 6. Verschuiving contactpositie buitenbeen bij aanbrengen asymmetrisch profiel

Het uitvoeren van een proef met een wijziging van de spoorwijdte heeft als gevolg van de hoge kosten niet plaatsgevonden.

Ten behoeve van de trein

Voor de trein is een asymmetrisch profiel ontworpen. Vanwege beschikbaarheidsproblemen van het spoor bij RIB is de proef niet uitgevoerd bij de trein, maar bij de metro (GVB-A). In figuur 7 is het gewijzigde profiel voor het binnenbeen geschetst.



Figuur 7. Gemeten referentie profiel en asymmetrisch profiel binnenbeen

Analyse van het geslepen profiel heeft geleerd dat het profiel afweek van het gewenste profiel. Dit kwam doordat de spoorstaaf al te veel was weggesleten. Hierdoor moest er teveel weggeslepen worden, wat om veiligheidsredenen niet mogelijk was.

Ten behoeve van de tram

Voor beide benen van een tramspoor is een ontwerp gemaakt van een asymmetrisch profiel, waarna een tramspoor bij het GVB-A is geslepen. Een foto van het slijpproces staat hierna.



Foto 5. Semi-automatisch slijpen op locatie

4.4.4 Wijzigen materiaal wiel of rail

Vanwege beperkingen ten aanzien van tijd en budget is er voor gekozen om alleen het materiaal van een wiel te wijzigen, in dit geval middels lasercladden.

Ten behoeve van de trein

Op een tweetal wielen is een coating '5508' door de firma Duroc aangebracht. Uit laboratoriumproeven is gebleken dat met deze coating een lagere wrijvingscoëfficiënt verkregen kan worden. Helaas kon een proef geen doorgang vinden omdat beide wielen bij het bevestigen op een dummy-as voor het cladproces dermate beschadigd waren dat deze niet meer opnieuw op een as te

monteren vielen. Door gebrek aan vertrouwen in de firma Duroc en tijd heeft een nieuwe proef niet kunnen plaatsvinden.

Ten behoeve van de tram

Vanwege het ontbreken van tijd en budget is deze maatregel niet voor trams onderzocht.

4.5 Conclusies

Naar aanleiding van de inventarisatie van de maatregelen kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Het blijkt dat het effect van een maatregel zeer wisselend kan zijn, bij verschillende onderzoeken is het verschil in behaalde geluidsreductie vaak erg groot. Een oorzaak hiervan is dat een type maatregel op meerdere manieren uitgevoerd kan worden, er zijn bijvoorbeeld veel verschillende typen wieldempers die in dit onderzoek allemaal onder één noemer vallen. Grote verschillen kunnen echter ook optreden bij exact dezelfde uitvoering van een maatregel. Booggeluid en de geluidsreductie hiervan blijken erg onvoorspelbaar.
- Er zijn weinig (ervarings)gegevens over kosten en effect van maatregelen beschikbaar.
- Ook voor de kostenvergelijking zijn er verschillen tussen trein- en tramwereld. De baanintensiteit is bijvoorbeeld voor de tramwereld vaak veel hoger, waardoor baanmaatregelen sneller aantrekkelijk zijn dan voor de treinwereld.
- Er zijn geen verrassende ‘nieuwe maatregelen’ gevonden, alle maatregelen waren min of meer al bekend. Wel is er veel extra informatie over de al bekende maatregelen verzameld en vormde dit een bevestiging van de praktijk.

Ten aanzien van de prototypen kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Voor treinen zijn inmiddels een aantal wieldempers leverbaar. Voor trams ligt de situatie moeilijker omdat montage van wieldempers op de verende wielen van een tram tot veiligheidsrisico's kan leiden. Meer onderzoek naar de veiligheid is nodig om een goede beproeving uit te kunnen voeren.
- Voor het wijzigen van de wrijving in het wiel-rail contact zijn succesvol prototypen gerealiseerd. Zowel voor trein als tram zijn, inmiddels operationele, mobiele doseerinstallaties gebouwd waarmee frictieverbetersaars en wielflenssmoer in het wiel-rail contact kunnen worden aangebracht.
- Het aanbrengen van een asymmetrisch profiel op de spoorstaaf is eigenlijk alleen bij nieuw spoor te realiseren. Bij een gebruikt en dus gesleten spoor treden te veel afwijkingen op.
- De mogelijkheden en het effect van het wijzigen van het materiaal van het wiel zijn nog niet bekend, omdat geen goede prototypen zijn verkregen.

5 Modelling

Dit hoofdstuk beschrijft het model voor de voorspelling van booggeluid dat in fase 5 van het onderzoek is ontwikkeld [5].

5.1 Inleiding

Aanleiding van het ‘Onderzoeksprogramma Booggeluid’ was het promotieonderzoek van Périard, waarin een model voor booggeluid ontwikkeld is. Dit model is niet gevalideerd en bij evaluatie van het model bleken de berekeningsresultaten niet overeen te komen met metingen en ervaringen bij specialisten. Er is voor gekozen om een nieuw model te ontwikkelen op basis van commercieel verkrijgbare softwarepakketten en bestaande theoretische modellen uit de literatuur. De bestaande softwarepakketten zijn SIMPACK voor voertuigdynamica en TWINS voor de dynamica en akoestiek van wiel en rail. De modellering van het wrijvingselement tussen wiel en rail is gedeeltelijk gehaald uit de literatuur waar nieuwe elementen aan zijn toegevoegd.

Het ontwikkelde rekenmodel voorspelt booggeluid met instabiele laterale slip als opwekkingsmechanisme. Er zijn andere mogelijke opwekkingsmechanismen voor booggeluid. Hiervoor kan het model later worden uitgebreid. De keuze voor modellering van booggeluid door laterale slip is gedaan vanwege het hoge geluidsniveau en de beschikbaarheid van deelmodellen in de literatuur.

Het model is ontwikkeld om het optreden van booggeluid te kunnen verklaren, om berekeningen uit te kunnen voeren naar het al dan niet optreden van booggeluid en om het geluidsniveau te berekenen. Door gebruik te maken van het rekenmodel zijn een aantal maatregelen tegen booggeluid gerant naar hun effectiviteit. Het model is gevalideerd met behulp van metingen aan een testbank. De resultaten hiervan worden in het volgende hoofdstuk besproken.

5.2 Algemene beschrijving van opwekkingsmechanismen

Bij het passeren van een boog of wissel treden de volgende effecten op:

- de wielassen staan niet meer haaks op het spoor;
- de wiel-rail contactpunten liggen niet allemaal op het loopvlak van het wiel, maar ook tegen de flens van het wiel;
- de afgelegde weg van binnen- en buitenwiel zijn niet gelijk.

Hierdoor is de interactie tussen wiel en rail complexer in een boog dan op een recht spoor. De interactie bestaat in een boog uit een combinatie van rollen met slip en wrijving in het flenscontact. Slip is gedefinieerd als de glijsnelheid gedeeld door de rolsnelheid.

De slip wordt onderverdeeld in drie richtingen:

- de longitudinale slip is de slip component in de rolrichting;
- de laterale slip is de slip component dwars op de rolrichting;
- de spinslip correspondeert met een draaiende slip van het wiel om een as loodrecht op het contactvlak.

De mate van longitudinale, laterale en spinslip is onder andere afhankelijk van de positie van het wiel in het draaistel. Uit voertuigdynamicaberekeningen komen de volgende algemene verschillen naar voren (zie figuur 9):

- Voor lage snelheid en/of hoge verkanting:
 - het voorste buitenwiel maakt flenscontact, spin slip en sterke laterale slip;
 - het voorste binnenwiel van een draaistel rolt met sterke laterale slip;
 - het achterste buitenwiel rolt met longitudinale slip;
 - het achterste binnenwiel maakt flenscontact en spin slip.
- Voor hoge snelheid en/of lage verkanting:
 - het voorste buitenwiel maakt flenscontact, spin slip en laterale slip;
 - het voorste binnenwiel van een draaistel rolt met laterale slip;
 - het achterste buitenwiel rolt;
 - het achterste binnenwiel rolt.

Hierdoor is het al dan niet optreden van booggeluid verschillend voor de vier wielen van een draaistel en afhankelijk van de rijsnelheid en verkanting.

De slip en wrijving veroorzaken krachten op wiel en rail. De grootte van deze krachten is afhankelijk van de wrijvingscoëfficiënt, die vervolgens afhankelijk is diverse parameters. Hier zal in paragraaf 5.3 op worden teruggekomen.

Bij het stationair doorlopen van een boog kunnen twee situaties optreden:

- de krachten zijn constant; er wordt geen booggeluid veroorzaakt;
- de krachten variëren met een hoge frequentie; er wordt booggeluid opgewekt.

Het al dan niet optreden van booggeluid is afhankelijk van:

- de mate van laterale, longitudinale en spinslip;
- het optreden van flenscontact;
- de wrijvingscoëfficiënt;
- de wiel- en raildynamica, in het bijzonder de demping van het wiel en de laterale contactpositie op de wielband.

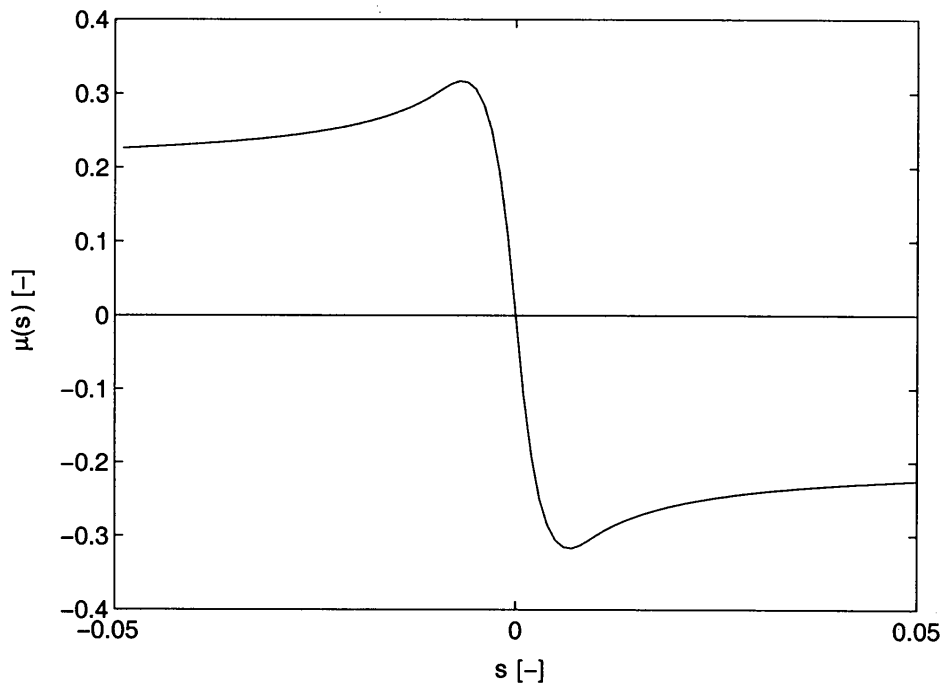
Hier zal in paragrafen 5.4 en 5.5 worden teruggekomen.

5.3 Wrijvingscoëfficiënt

De wrijvingscoëfficiënt $\mu(s_0) = F_y/F_x$, is gedefinieerd als de verhouding tussen de kracht F_y in de sliprichting en de normaalkracht F_x in het contactvlak. De wrijvingscoëfficiënt is mede afhankelijk van de slip s_0 . Figuur 8 geeft als voorbeeld het verloop van de wrijvingscoëfficiënt voor laterale slip. De hoogte van de piekwaarde voor de wrijvingscoëfficiënt is evenredig met de statische wrijving μ_0 . Een hoge waarde voor de wrijvingscoëfficiënt vergroot de kans op booggeluid.

De statische wrijvingscoëfficiënt μ_0 is gevoelig voor:

- verontreinigingen op de rails (zoals water in de vorm van luchtvochtigheid en regen, vet, olie) en stof van zachte materialen (zoals grafiet); dit verlaagt de wrijving;
- stof (gruis en zand) van harde materialen; dit verhoogt de wrijving;
- meteorologische condities welke een invloed op vochtigheid en stof kunnen hebben waardoor de wrijving verlaagd of verhoogd kan worden;
- variaties in wiellast; een hogere wiellast geeft een geringe verlaging van de wrijvingscoëfficiënt (de wrijvingskracht gaat wel omhoog omdat de normaalkracht omhoog gaat);
- grootte van het contactoppervlak; een groter oppervlak gaat gepaard met een hogere wrijvingscoëfficiënt. Het contactoppervlak is afhankelijk van het wiel en railprofiel. Een wielband en een railkop die op elkaar zijn ingesleten maken een groter contactoppervlak waardoor een hogere wrijvingscoëfficiënt ontstaat.

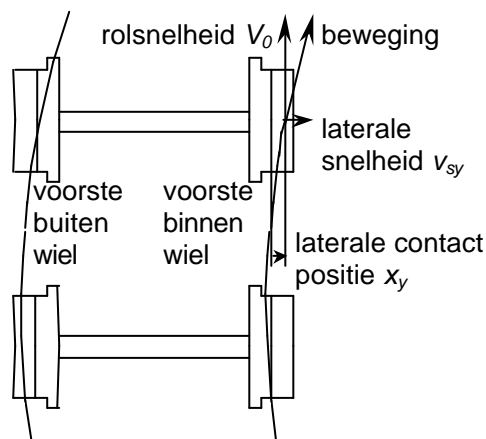


Figuur 8. Voorbeeld van wrijvingscoëfficiënt $\mu(s_0) = F_y/F_x$ als functie van laterale slip s_0 (statische wrijvingscoëfficiënt $\mu_0 = 0.4$)

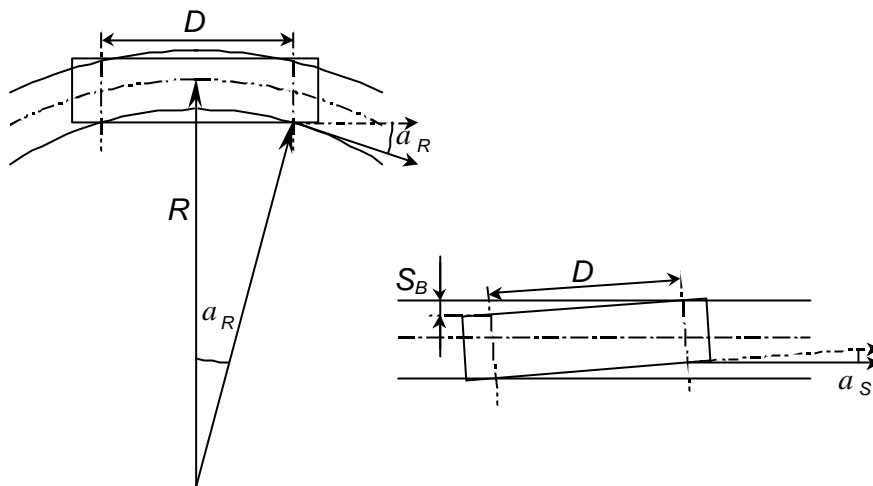
De relatie tussen de wrijvingscoëfficiënt en de parameters wie llast, wiel- en railprofiel is bekend als formule. De invloed van materiaalparameters en vervuiling van het contactoppervlak op de wrijvingscoëfficiënt moet worden gemeten op een testbank.

5.4 Booggeluid door instabiele laterale slip

Het voorste binnenwiel rolt met laterale slip (zie figuur 9) en kan hierbij booggeluid opwekken als instabiliteit optreedt. De laterale slip $s_y = v_{sy}/V_0$ is gedefinieerd als de verhouding tussen de laterale slipsnelheid v_{sy} en de rolsnelheid V_0 . Deze laterale slip s_y is ongeveer gelijk aan de aanloophoek a (rad). De aanloophoek wordt veroorzaakt door de boogstraal (a_R) en door het schranken van een draaistel (a_S) bij lage snelheid of hoge verkanting (zie figuur 10).

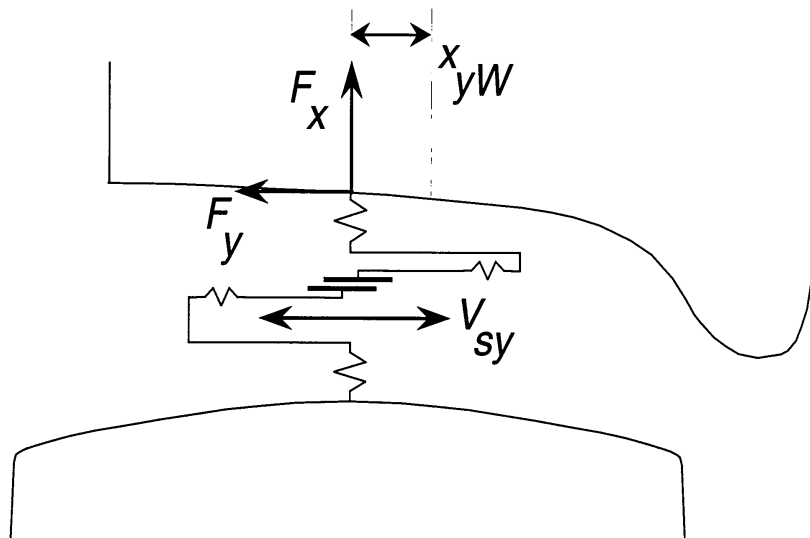


Figuur 9. Laterale slip van het voorste binnenwiel



Figuur 10. Schematische weergave van de twee effecten bij het bepalen van de aanloophoek
(- - - - - = bewegingsrichting, ————— = rolrichting)

Het theoretische model laat zien dat de laterale slip in een stabiel of een instabiel bedrijfspunt kan verkeren. Bij een stabiel bedrijfspunt is de laterale slip constant in de tijd. Bij een instabiel bedrijfspunt oscilleert de laterale slip s_y rond een gemiddelde waarde s_0 . De oscillatie vindt plaats bij een hoge frequentie, gelijk aan de booggeluidfrequentie.



Figuur 11. Wiel en raildynamica, een wrijvingselement en de contactstijfheid bepalen het model voor booggeluid door laterale slip

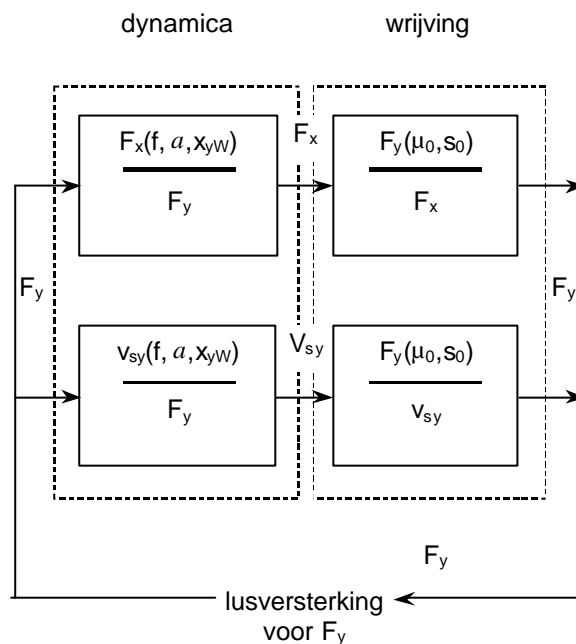
Om de stabiliteit van de laterale slip te bepalen, moet de interactie tussen wiel en rail worden gemodelleerd. Hierbij spelen de volgende elementen een rol (zie figuur 11):

- wieldynamica;
- raildynamica;
- dynamica van het wiel-rail contact;
- een wrijvingselement voor de slip tussen wiel en rail.

Voor de interactie tussen wiel en rail is een blokdiagram opgesteld (zie figuur 12). In dit blok komen de volgende drie belangrijke grootheden voor:

- normaalkracht F_x in het contactpunt tussen wiel en rail;
- laterale kracht F_y ;
- laterale slipsnelheid v_{sy} .

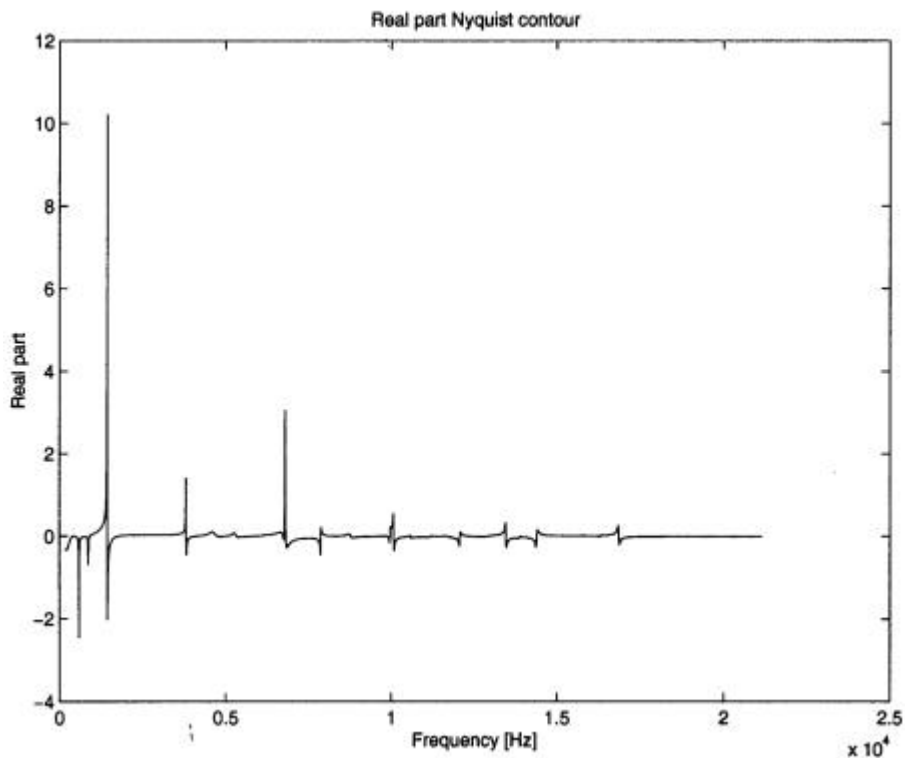
In het blokdiagram wordt aangegeven dat de normaalkracht en laterale slipsnelheid het gevolg zijn van de laterale kracht die werkt op de dynamica van wiel, rail en de contactstijfheid. De laterale kracht is vervolgens bepaald door de normaalkracht en de laterale slipsnelheid die werken op het wrijvingsselement. Hierdoor ontstaat een cirkelinteractie. Een hoofdparameter van de cirkelinteractie is de lusversterking. Een lusversterking groter dan 1 veroorzaakt instabiliteit.



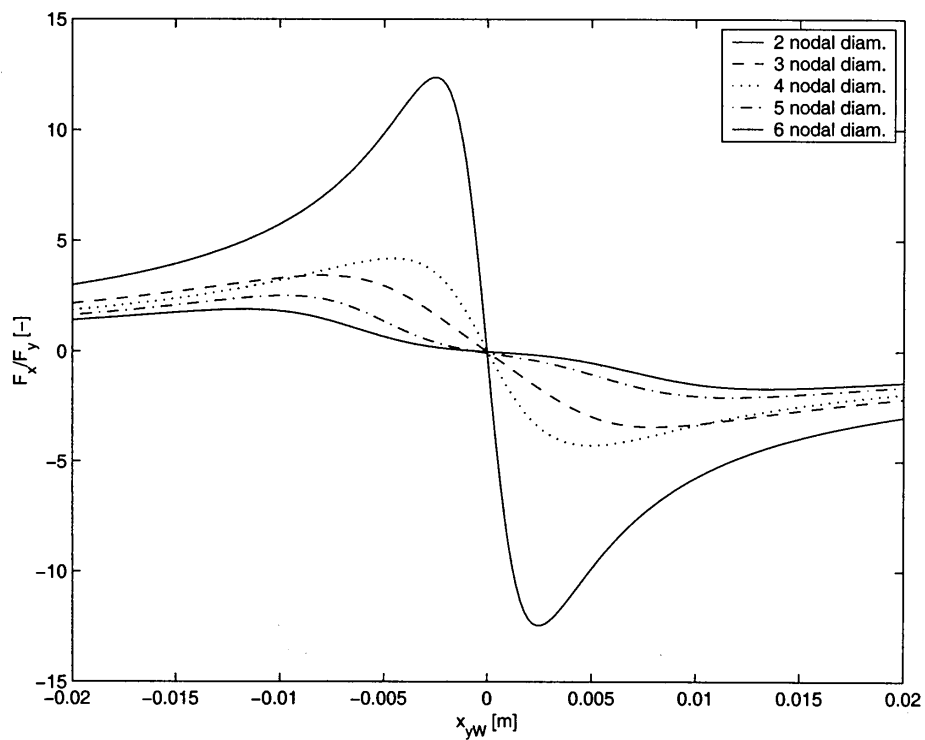
Figuur 12. Blokdiagram van de cirkelinteractie tussen normaal kracht F_x , laterale kracht F_y en de laterale slipsnelheid v_{sy} , afhankelijk van de frequentie f , de laterale contactpositie op de wielband x_{yW} , de wielverliesfactor a , de statische wrijving μ_0 en de gemiddelde laterale slip s_0

De dynamicablokken in figuur 12 vertonen scherpe pieken bij de resonantiefrequenties van het wiel, met name de resonanties waarbij de axiale beweging van het wiel sterk is (zie figuur 13). De pieken zijn lager bij een hogere verliesfactor a , bijvoorbeeld in het geval van een wielderper. De hoogte van de pieken wordt ook beïnvloed door de laterale contactpositie op de wielband x_{yW} (zie figuur 14).

De wrijvingsblokken in figuur 12 bestaan uit twee delen. Het bovenste blok wordt gevormd door de wrijvingscoëfficiënt $F_y/F_x = \mu(s_0)$, die vervolgens afhankelijk is van de statische wrijving μ_0 en van de gemiddelde laterale slip s_0 (zie figuur 8). Het onderste blok is bepaald door de afgeleide van de wrijvingscoëfficiënt naar de laterale slip, ofwel de helling in de grafiek voor de wrijvingscoëfficiënt.



Figuur 13. Lusversterking uitgezet tegen de frequentie met pieken in de lusversterking die samen vallen met de axiale resonantie frequenties van het wiel. De hoogte van de pieken kan verlaagd worden door toepassing van wioldempers



Figuur 14. Bovenste dynamicablok: Voorbeeld van de relatie $F_x(f_n)/F_y(f_n)$, voor de resonantiefrequenties f_n van vijf axiale wiel modes, als functie van de laterale contact positie x_{yw} op de wielband (een negatieve waarde voor x_{yw} correspondeert met een contactpositie dicht bij de flens)

Uit het model volgen een aantal maatregelen die de kans op booggeluid van het voorste binnenwiel verlagen via een lagere wrijving μ_0 , verhoogde demping a of een lagere slip s_0 :

- smering van wiel of rail zorgt voor lage statische wrijving μ_0 ;
- een railkop met een scherp profiel (geen versleten rail) zorgt voor een klein contactoppervlak en daardoor een geringe afname van de statische wrijving μ_0 ;
- een wielderper voor axiale wielmodes zorgt voor verhoging van de verliesfactor a ;
- een positie van het wiel-rail contact dicht bij de wielflens van het voorste binnenwiel zorgt voor een lage lusversterking;
- vergroting van de boogradius en verkleining van het spoorspel verlagen de laterale slip s_0 ;
- hoge rijnsnelheid en lage verkanting verlagen de laterale slip s_0 .

5.5 Booggeluid door andere opwekkingsmechanismen

Mogelijke andere opwekkingsmechanismen voor booggeluid zijn:

- het schuren of wrijven van de flens langs de rail zal geluid produceren, het is echter niet bekend of dit ook het luide, hoogfrequente tonale geluid veroorzaakt, dat kenmerkend is voor booggeluid;
- naast instabiliteit in de laterale slip kan ook instabiliteit voor slip in de longitudinale richting en voor spin-slip optreden;
- een andere mogelijke bron is het tweepuntcontact tussen wiel en rail, dat in een aantal situaties optreedt.

Deze mogelijke opwekkingsmechanismen kunnen in eventuele vervolgproujecten worden bestudeerd.

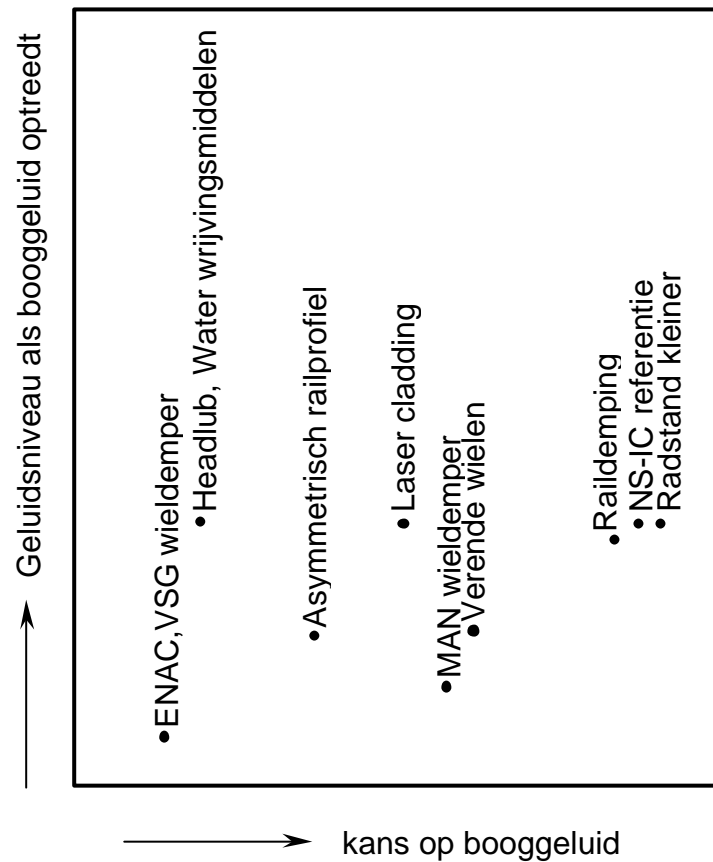
5.6 Ranking van maatregelen

In een voorgaande fase van het project zijn een aantal potentiële maatregelen tegen booggeluid geselecteerd. Met het rekenmodel zijn deze maatregelen gerankt op hun effectiviteit. Hierbij wordt een verschil gemaakt tussen het verlagen van de kans op booggeluid en het verlagen van het geluidsniveau als booggeluid optreedt.

Afhankelijk van boogstraal, spoorspel, vervuiling van wiel en rail et cetera kan booggeluid wel of niet optreden. In de berekeningen wordt daarom rekening gehouden met een groot aantal verschillende situaties. De kans op booggeluid is berekend voor deze groep van situaties. De maatregelen blijken niet sterk genoeg om booggeluid in alle gevallen te voorkomen.

De berekeningen gebruiken een aantal invoerparameters. Zo worden de gemeten verliesfactoren van wielderpers en verende wielen gebruikt. Tevens wordt de gemeten statische wrijvingscoëfficiënt bij optimale dosering van wrijvingsmiddelen en bij lasercladding gebruikt.

De resultaten van de ranking zijn weergegeven in figuur 15. De ENAC en VAG wielderper zorgen voor een hoge demping van de axiale wielmodes en verlagen daardoor de kans op booggeluid en het geluidsniveau. De wrijvingsmiddelen als Headlub en water verlagen de wrijving en daarmee de kans op booggeluid. Het asymmetrische profiel heeft een scherp railprofiel met de top asymmetrisch ten opzichte van raildwarsdoorsnede. Hierdoor wordt de statische wrijvingscoëfficiënt verlaagd, de laterale slip verlaagd en de contactpositie op de wielband gunstig beïnvloed. Hierdoor wordt zowel de kans op booggeluid als het geluidsniveau gereduceerd.



Figuur 15. Grafische weergave van de invloed van de maatregelen op de kans van optreden (horizontaal) en op het geluidsniveau indien booggeluid door laterale slip optreedt (verticaal)

5.7 Conclusies modellering

De modellering van booggeluid door instabiele laterale slip heeft inzicht verschaft in dit ontstaansmechanisme. Met name de invloed van de laterale contactpositie op de wielband op het al dan niet optreden van booggeluid is een nieuw ontdekt fenomeen. Van dit fenomeen wordt gebruik gemaakt bij het asymmetrisch railprofiel.

De kern van het model is een nieuwe rekenmodule voor de instabiele laterale slip. Daarnaast wordt gebruik gemaakt van commercieel beschikbare software pakketten SIMPACK (voertuigdynamica) en TWINS (wiel en rail dynamica en akoestiek). Het rekenmodel heeft een gemeten curve voor de wrijving als invoer nodig. Deze wrijving is afhankelijk van smering, coating, wiel- en railmateriaal.

Met het totale rekenpakket kan worden berekend of booggeluid optreedt. Ook kan het geluidsniveau worden berekend als booggeluid optreedt. Deze berekeningen zijn uitgevoerd voor verschillende maatregelen tegen booggeluid. Op basis van de resultaten zijn de maatregelen gerankt. Drie maatregelen scoren hoog in de ranking: wieltempers, frictie verbeteraars en de combinatie van asymmetrisch railprofiel met spoorvernaauwing.

6 Laboratoriummetingen

Dit hoofdstuk beschrijft de in fase 6 van het project ontwikkelde testbank en de metingen die hieraan zijn uitgevoerd. Voor meer informatie wordt verwezen naar de achterliggende rapporten [6, 7].

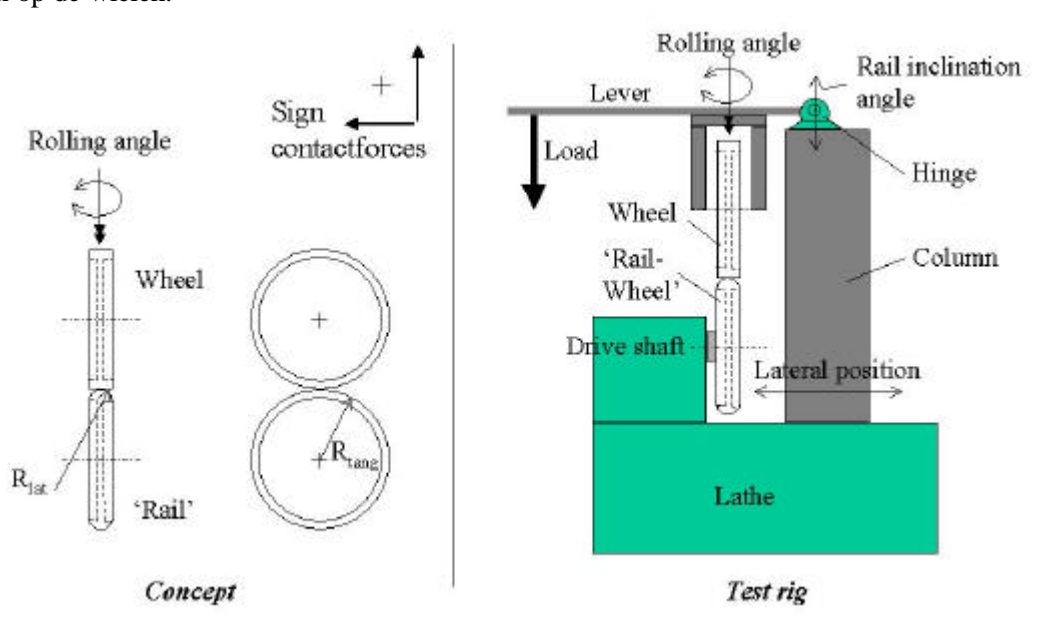
6.1 Inleiding

Vanwege de vele invloedfactoren, waaronder meteorologische factoren, is het moeilijk veldmetingen onder controleerde omstandigheden reproduceerbaar uit te voeren. Als ondersteuning van de veldmetingen is gekozen voor laboratoriummetingen op een testbank. Hiervoor is speciaal een testbank ontwikkeld. Op deze testbank kunnen metingen uitgevoerd worden waarbij de dynamica van wiel en rail en de invloed van de wrijving kunnen worden beproefd. De testbank is niet bedoeld voor voertuigdynamicametingen.

De testbank is ontwikkeld voor het uitvoeren van validatie metingen, wrijvingsmetingen aan verschillende materialen, coatings- en wrijvingsmiddelen en metingen voor de beproeving van maatregelen tegen booggeluid.

6.2 Beschrijving van de testbank

De testbank is een 1:3 schaalmodel, zie figuur 16 en foto 6. Twee wielen zijn gemonteerd op een draaibank, die zorgt voor een variabele aandrijving. Wiellast, aanloophoek, rolsnelheid, verkanting en laterale contactpositie kunnen nauwkeurig worden ingesteld. De wielen zijn te vervangen door wielen met andere materialen, profielen, coating of demping. Daarnaast zijn wrijvingsmiddelen aan te brengen op de wielen.



Figuur 16. Diagram van de testbank voor booggeluid metingen

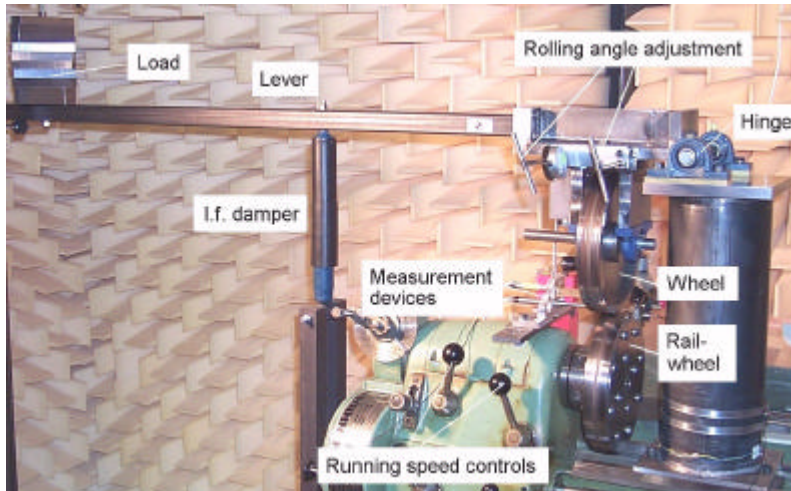


Foto 6. Foto van de testbank

6.3 Validatiemetingen

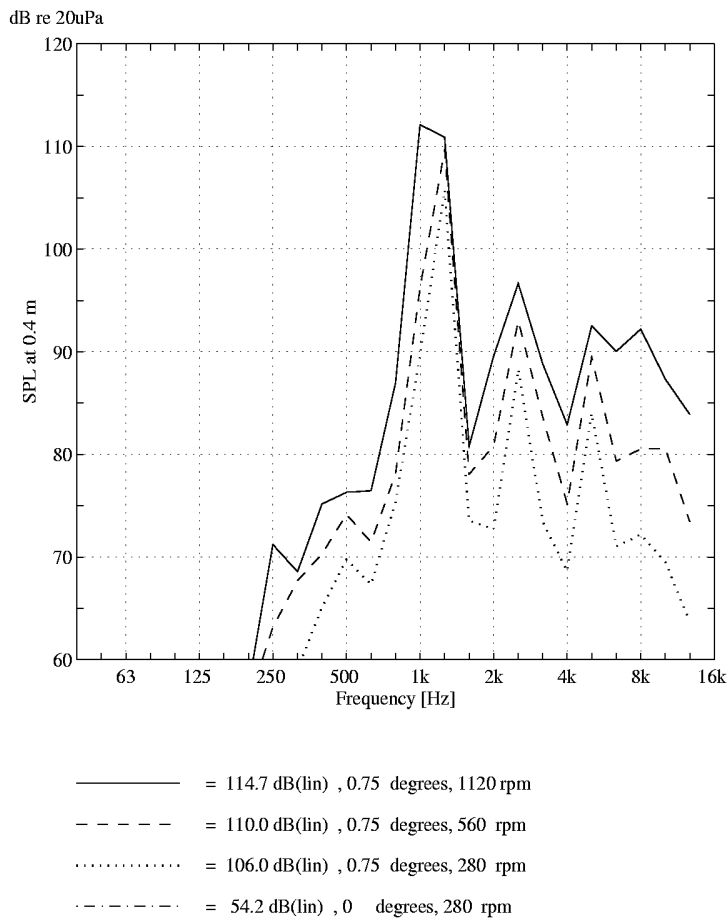
Er zijn een aantal validatiemetingen uitgevoerd waarbij onderstaande parameters en grootheden zijn gevalideerd:

- wrijvingscoëfficiënt van ‘schone’ stalen wiel op stalen rail bij verschillende wiellasten, rolsnelheden, laterale slip en wielprofielen;
- optredende wisselende en gemiddelde contactkrachten tussen wiel en rail onder verschillende omstandigheden;
- optredende relatieve wisselende verplaatsing tussen wiel en rail onder verschillende omstandigheden;
- optredende geluidsdruk onder verschillende omstandigheden;
- invloed van laterale contactpositie op het wiel;
- invloed van wioldemping.

De verschillen tussen de meetresultaten en de modelvoorspellingen worden beschouwd als aanvaardbaar. Aan de hand van deze metingen is het model gevalideerd.

6.4 Metingen aan maatregelen

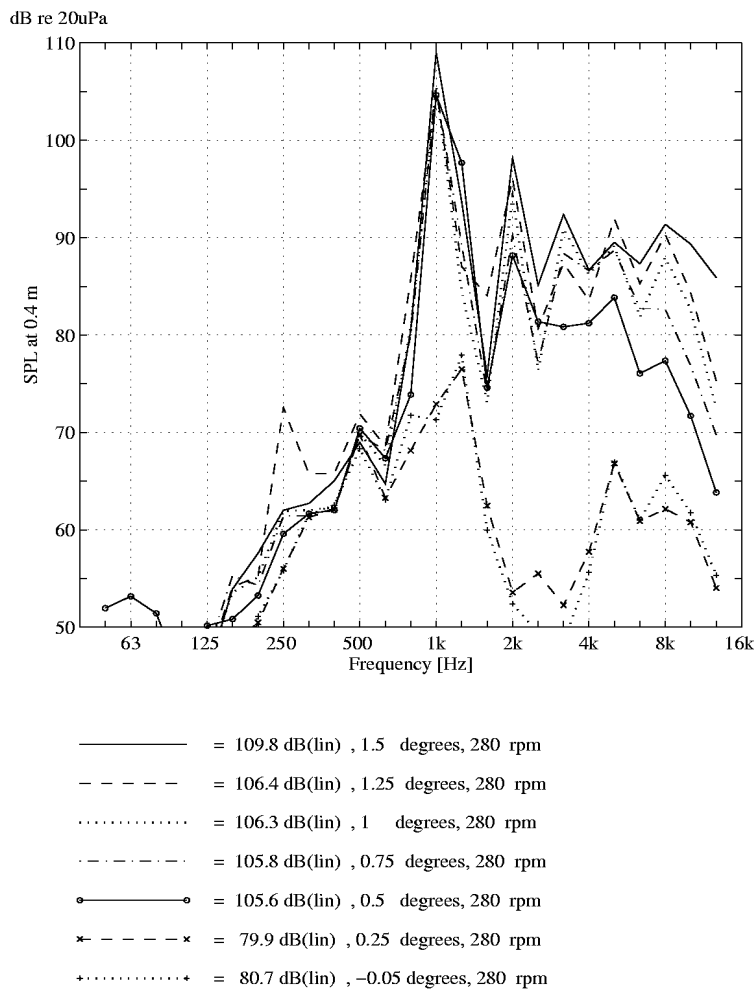
In deze paragraaf worden de uitkomsten van een aantal laboratoriummetingen beschreven.



Figuur 17. Invloed van rolsnelheid op geluidsniveau, met overige parameters constant (meting bij aanloop hoek van 0° levert meting van rolgeluid)

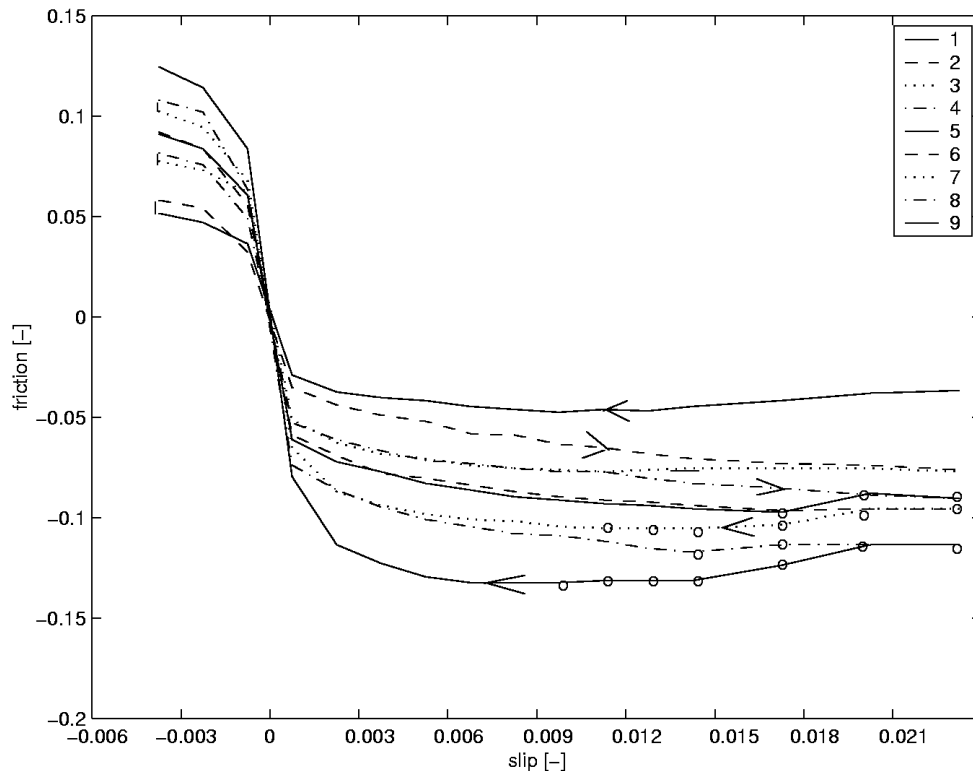
Figuur 17 geeft de meetresultaten van het geluidsniveau bij toerentallen van 280, 560 en 1120 rotaties per minuut (overeenkomstig rolsnelheden van 3.7, 7.3 en 14.7 m/s of 13.2, 26.4 en 52.7 km/h) bij een aanloophoek van 0.75° . De gemeten geluidsdrukken zijn respectievelijk 106.0, 110.0 en 114.7 dB(A). De geluidsdruk neemt 4.7 dB(A) toe tussen 560 en 1120 rpm. Het rekenmodel voorspelt een toename van 6 dB per snelheidsverdubbeling.

Figuur 18 geeft de meetresultaten van het geluidsniveau bij aanloophoeken van -0.05° tot 1.5° (overeenkomstig aanloophoeken van -0.0009 tot 0.026 radialen of een laterale slip van -0.09% tot 2.6%). De metingen laten zien dat booggeluid optreedt bij een aanloophoek van 0.5 graden en groter. De geluidsdruk neemt 4.3 dB toe tussen 0.75° en 1.5° . Het rekenmodel beschrijft een 6 dB toename bij verdubbeling van de aanloophoek voor grote waarden van de aanloophoek.



Figuur 18. Invloed van aanloophoek op geluidsniveau, met overige parameters constant (metingen bij aanloophoek van -0.05° en 0.25° levert meting van rolgeluid)

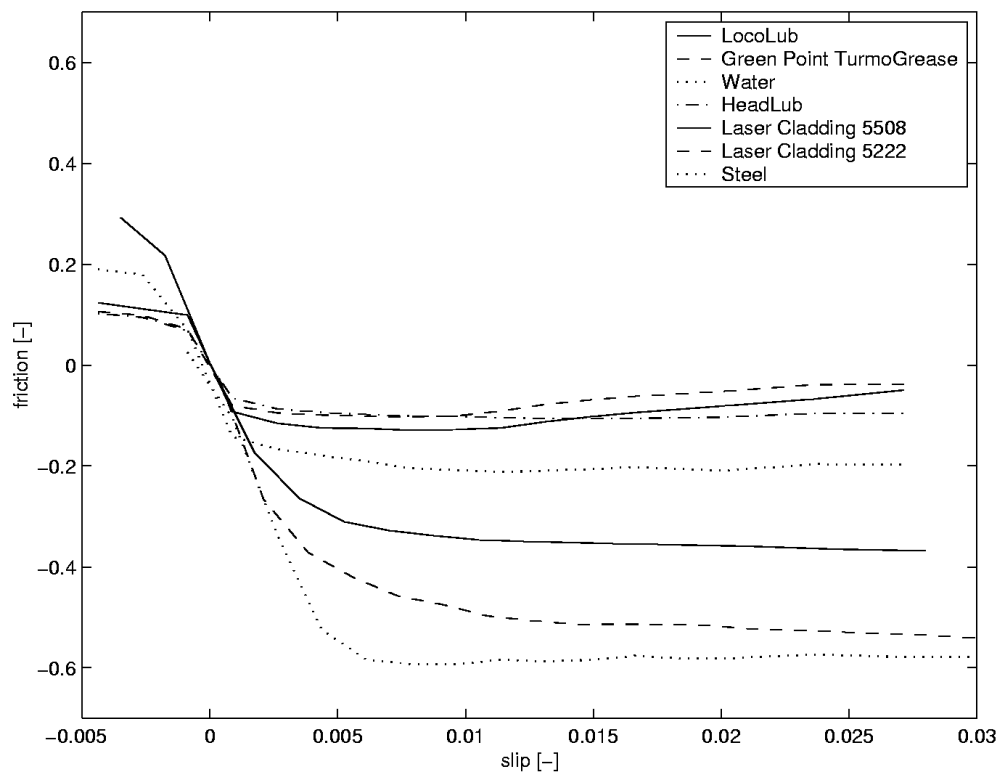
De wrijving wordt beïnvloed door het wiel- en railmateriaal en de aanwezigheid van een coating of van een wrijvingsmiddel. De geteste wrijvingsmiddelen verlagen allemaal de wrijving. De mate waarin een wrijvingsmiddel de wrijving beïnvloedt is afhankelijk van de dosering.



Figuur 19. Wrijvingscoëfficiënt gedurende 9 meetcycli (met slip variërend tussen 0.025 en -0.005rad) na aanbrengen HeadLub. De meetpunten waarbij booggeluid optreedt, zijn aangegeven met een o)

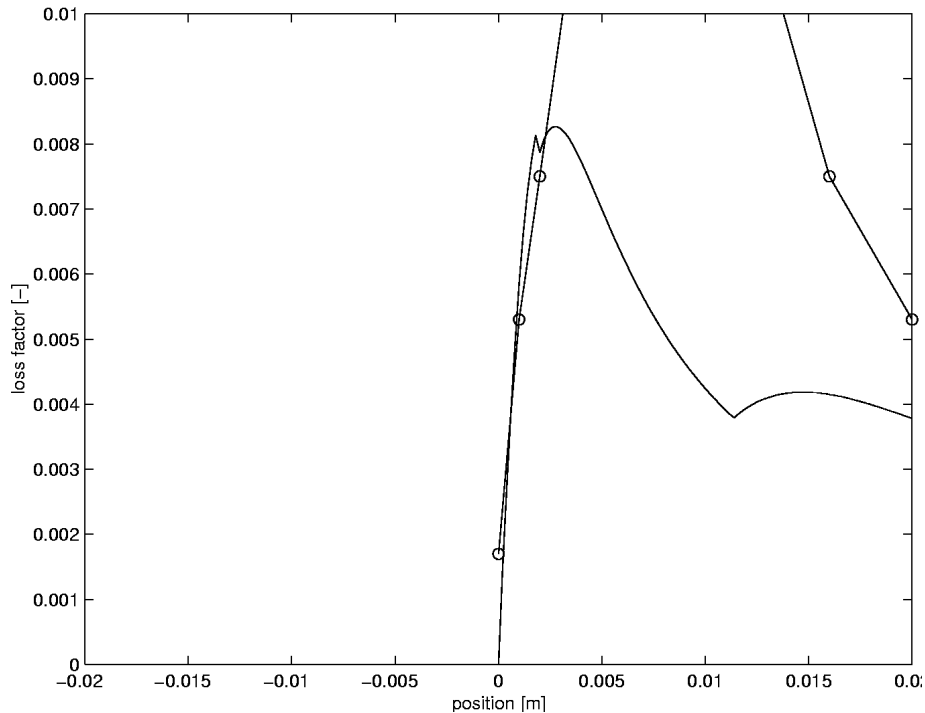
Figuur 19 laat zien dat na het aanbrengen van een royale hoeveelheid Headlub, de wrijvingscoëfficiënt lager is dan bij een schoon en droog contact tussen wiel en rail. Tevens treedt geen booggeluid meer op. Figuur toont 9 meetcycli waarbij de aanloophoek varieert van 0.023 naar -0.004 (rad) en terug. De meetcycli zijn chronologisch genummerd van 1 tot en met 9. Door het wegslingeren en uitrijden van de Headlub verdwijnt het wrijvingsmiddel en neemt de wrijvingscoëfficiënt weer toe. Bij een gegeven waarde van de wrijvingscoëfficiënt gaat booggeluid weer optreden. Figuur 19 zijn de meetpunten waarbij booggeluid optreedt aangegeven met een 'o'. Bij de optimale dosering is de wrijving zo hoog mogelijk zonder dat booggeluid optreedt (meetcyclus 3).

Figuur 20 laat de wrijvingscoëfficiënt zien bij optimale dosering van LocoLub, Green Point TurmoGrease en Headlub. Tevens laat dit figuur de wrijvingscoëfficiënten zien van water (bevochtigde wielen), lasercladding (5508 en 5222) en een schoon staal-op-staal contact. Lasercladding is een methodiek waarbij met een laser een coating aangebracht wordt. De twee coatings van de firma Duroc zijn op ijzerbasis met 15% Cr en 2% Ni (5508) of op Cobalt-basis met 25% Cr (5222).



Figuur 20. Wrijvingscoëfficiënt voor staal, water, lasercladding (5508 en 5222 van Duroc) en wrijvingsmiddelen LocoLub, HeadLub en Green Point Turmogrease (de wrijvingsmiddelen zijn gedoseerd zodat net geen booggeluid optreedt)

Wieldempers zorgen voor een verhoging van de verliesfactor a van het wiel. De verliesfactor moet groter zijn dan een kritische waarde om booggeluid te verhinderen. Middels een meting is de relatie tussen deze kritische waarde en de laterale contactpositie op de wielband onderzocht. Hiervoor is het testwiel voorzien van bevestigingsgaten voor het monteren van dempingplaten. Door variatie van het aantal dempingplaten kan de verliesfactor van het wiel gevarieerd worden tussen $a = 10^{-4}$ (ongedempt) en $a = 0.0075$ (bij het maximale aantal dempingplaten). Bij een gegeven testsituatie wordt het aantal dempingplaten verhoogd totdat net geen booggeluid meer optreedt. De bijbehorende verliesfactor van het wiel is gelijk aan de kritische waarde bij die gegeven testsituatie. Figuur 21 laat zien dat de gemeten kritische verliesfactor (o—o—o) afhankelijk is van de laterale contactpositie op de wielband. De kritische verliesfactor voor deze situatie is ook berekend met het model (—). Figuur 21 laat ook zien dat er een ‘worse case’ is voor de laterale contact positie, waarbij de kritische verliesfactor hoog is. Ook laat de figuur zien dat voor een negatieve waarde van de contactpositie (dicht bij de wielflens) er geen booggeluid optreedt.



Figuur 21. Gemeten (o—o—o) en berekende (—) minimale verliesfactor die nodig is om het optreden van booggeluid tegen te gaan (aanloophoek 0.013 (rad), 280 rpm), afhankelijk van de contactpositie

6.5 Conclusies laboratoriummetingen

Voor het uitvoeren van laboratoriummetingen voor instabiele laterale slip is een testbank ontwikkeld. Op deze testbank zijn verschillende parameters in te stellen en kunnen metingen onder controleerbare en reproduceerbare omstandigheden worden uitgevoerd.

De laboratoriummetingen hebben drie functies:

- Het valideren van het rekenmodel aan de hand van metingen. De verschillen tussen de meetresultaten en de modelvoorspellingen zijn aanvaardbaar en het model wordt als gevalideerd beschouwd.
- Het meten van de wrijving. Van verschillende coatings (lasercladden) en wrijvingsmiddelen zijn de wrijvingscurves gemeten.
- Het evalueren van maatregelen tegen booggeluid. De volgende maatregelen zijn beproefd: profielveranderingen, veranderingen van laterale contactpositie, wioldempers, lasercladden en wrijvingsmiddelen. Hun positieve invloed op de reductie van booggeluid is door middel van metingen aangetoond.

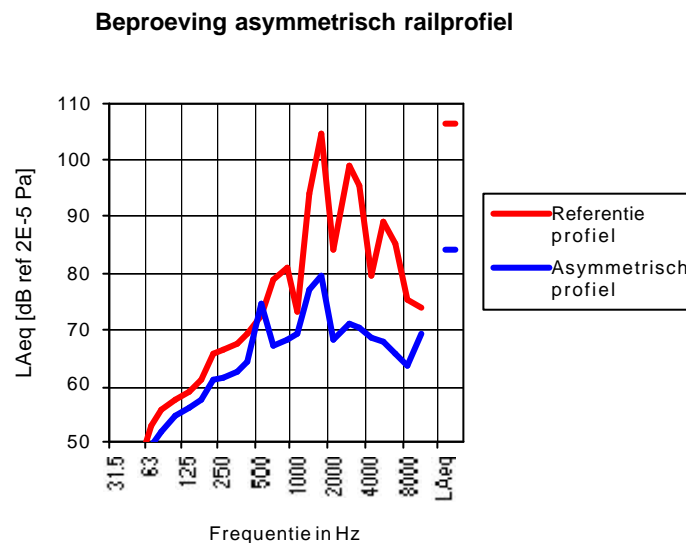
7 Volle schaal metingen

Dit hoofdstuk beschrijft de geluidsmetingen die zijn uitgevoerd aan de in het hoofdstuk 4 beschreven maatregelen. Deze praktijkproeven zijn uitgevoerd in de fasen 7 en 10 van het onderzoeksprogramma. Het betreft met name de aanpassing van het railprofiel, toepassing van verende wielen, beïnvloeding van de wrijvingseigenschappen en de toepassing van wiel- en raildempers. Voor meer informatie wordt verwezen naar de achterliggende rapporten [8 tot en met 12]. Daarnaast worden nog enkele beproevingen aan maatregelen besproken die niet in hoofdstuk 4 zijn besproken omdat ze buiten het kader van dit onderzoek vielen.

7.1 Asymmetrisch railprofiel

Het railprofiel is van invloed op de positie van het wiel-rail contactvlak en speelt daardoor een belangrijke rol in het ontstaan van booggeluid. Om een indicatie te krijgen welke geluidsreductie haalbaar is door het aanpassen van het railprofiel, is een experiment uitgevoerd bij het GVB-A. Volgens het meetprotocol wordt het geluidsniveau in de boog gemeten voor en na de aanpassing. Daaruit volgt de feitelijke geluidsreductie.

De resultaten van deze praktijkproef tonen aan dat een enorme geluidsreductie kan worden gerealiseerd met het asymmetrisch slijpen van railprofiel. Dit blijkt duidelijk uit het 1/3 octaaf frequentiespectrum van de equivalente geluidsniveaus in figuur 22.



Figuur 22. Gemiddeld equivalent geluidsniveau voor en na asymmetrisch slijpen van railprofiel

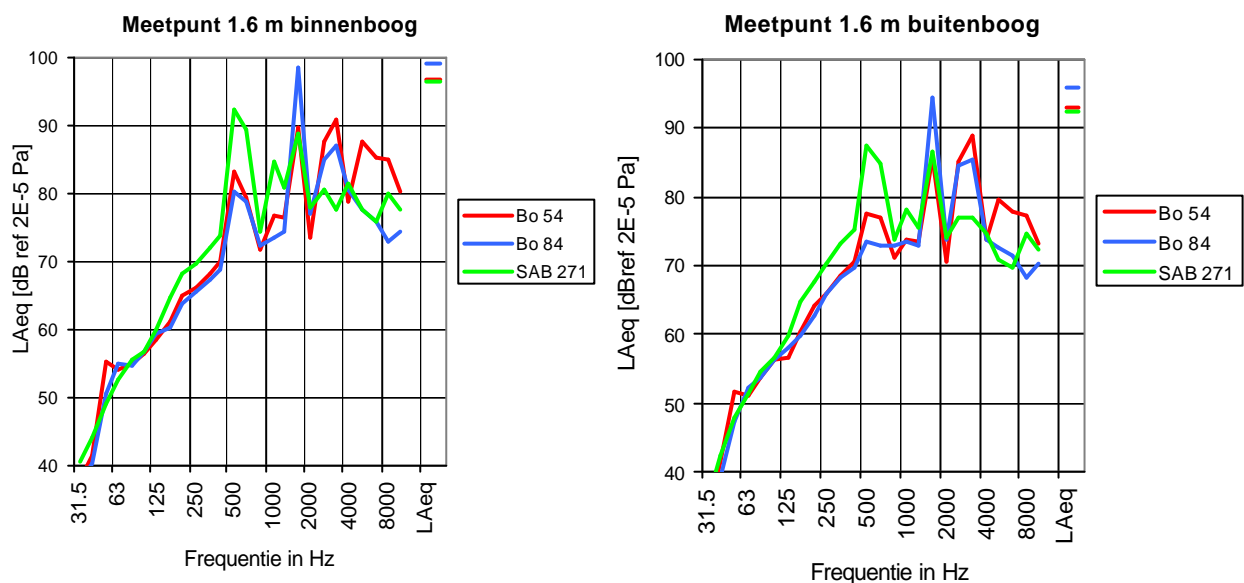
Voor het slijpen wordt het geluidsniveau in het hoogfrequente gebied tussen 400 Hz en 10 kHz gedomineerd door booggeluid. Nadat de maatregel is getroffen zijn de meeste booggeluidpieken qua hoogte fors afgenomen. In het ongunstige geval loopt het geluidsniveau terug van 106 dB(A) naar 86 dB(A). Hierbij zijn niet alle pieken uit het frequentiespectrum verdwenen. In het gunstige geval treedt booggeluid helemaal niet meer op zodat het niveau tot 76 dB(A) is gedaald.

Op basis van deze metingen kan worden geconcludeerd dat het aanpassen van het railprofiel een zeer effectieve maatregel kan zijn om booggeluid te bestrijden. De meetgegevens kunnen als een bruikbare referentie worden beschouwd voor wat met deze maatregel in de praktijk realiseerbaar is.

7.2 Verende wielen

Het huidige materieelpark van de HTM is uitgerust met verschillende typen verende wielen: SAB-R 271, Bochum 84 (BVV) of Bochum 54 (BVV). In deze praktijkproef worden de genoemde wielen onderzocht met betrekking tot de productie van booggeluid. Volgens het booggeluid meetprotocol worden de geluidsniveaus aan beide kanten van het spoor gemeten. De metingen voor de verschillende wieltypen zijn uitgevoerd op dezelfde dag en op een locatie.

De geluidsmetingen tonen aan dat het niveau van het optredende booggeluid afhankelijk is van het wieltype. De gemiddelde geluidsspectra per wieltype zijn gepresenteerd in figuur 23 aan de hand van metingen op 1.6 m, aangezien de metingen op twee gekozen afstanden vergelijkbare resultaten opleveren. In het laagfrequente gebied is het onderlinge verschil tussen de equivalente geluidsniveaus gering. Het geluidsniveau van de tramstellen met SAB 271 wielen is enigszins hoger dan de tramstellen met de andere twee typen wielen. In het hoogfrequente gebied zijn de SAB 271 pieken duidelijk lager dan de andere pieken (met uitzondering van de eerste piek). Op basis van de spectra kan worden vastgesteld dat de tramstellen met SAB 271 wielen gemiddeld 1 tot 3 dB(A) minder booggeluid produceren dan die met Bo 84 of Bo 54 wielen.



Figuur 23. Spectra L_{Aeq} gemeten op 1.6 m bij binnen- en buitenboog

Om er achter te komen waarom SAB 271 wielen akoestisch beter functioneren, is er eveneens een modale analyse uitgevoerd, waarbij de dempingwaarden van de verschillende typen wielen bij hun eigenfrequenties experimenteel zijn bepaald. Uit de modale analyse blijkt dat Bochum 84 en 54 wielen hogere dempingwaarden hebben dan SAB 271 wielen bij de lage eigenfrequenties tot 1 kHz. In het frequentiegebied tussen 1 en 6 kHz geldt het omgekeerde: de demping van SAB 271 wielen is aanzienlijk hoger dan die van Bo 84 en 54 wielen (De dempingwaarden zijn in het algemeen een factor 2 tot 5 hoger). Dit betekent dat SAB 271 wielen veel beter in staat zijn om de trillingen in dit frequentiegebied te dempen dan de andere twee typen wielen. In de geluidsspectra in figuur 23 kan duidelijk worden waargenomen dat de meeste hoge pieken van het booggeluid zich in dit frequentiegebied bevinden. Met andere woorden, de demping is actief in het gebied waar het nodig is. Dit vormt een mogelijke verklaring waarom tramstellen uitgevoerd met SAB 271 wielen het minste booggeluid veroorzaken.

7.3 Wijzigen wrijvingsgedrag

In deze paragraaf komen vooral de effecten van het aanbrengen van frictieverbetersaars en smeermiddelen op het loopvlak en de flens aan de orde. De belangrijkste resultaten van de diverse praktijkproeven uitgevoerd bij de HTM zijn samengevat in tabel 1. De referentiemetingen zijn uitgevoerd op een stuk droog (geen regen) en onbehandeld spoor in de boog, waarmee geluidsniveaus die representatief zijn voor de oorspronkelijke situatie zijn vastgesteld. In meting no.1 is het smeermiddel Turmogrease aangebracht op het spoor met een smerstrip vanuit de referentieconditie. In meting no. 2 is het spoor gesmeerd met een smerwagen, waarbij de frictieverbeteraar Headlub op het binnenbeen is aangebracht en het smeermiddel van de HTM op het buitenbeen (In dit verslag wordt dit smeermiddel verder afgekort als SM-HTM). In meting no. 3 is Turmogrease handmatig direct op het spoor aangebracht. Het spoor was eerder behandeld met Headlub op het binnenbeen en SM-HTM op het buitenbeen.

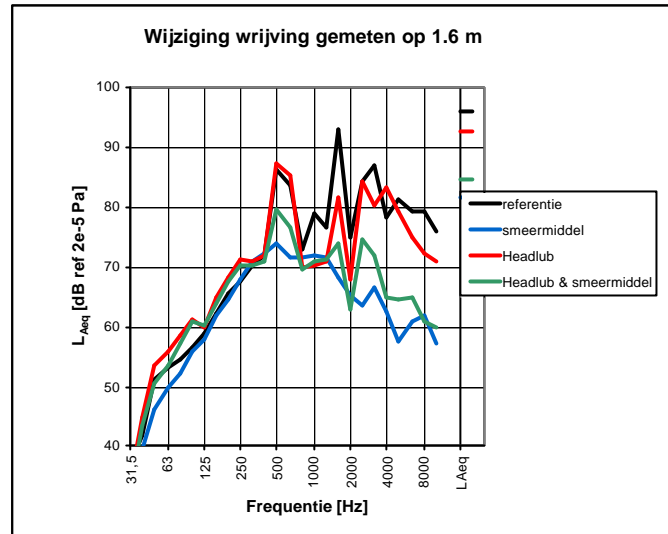
Tabel 1. Akoestische reductie in binnenzijde boog bereikt door aanpassing wrijvingsgedrag

Referentie	Droog en onbehandeld		$L_{Aeq} = 97 \text{ dB(A)}$
	Behandeling binnenbeen	Behandeling buitenbeen	
1	Turmogrease	Turmogrease	16 dB(A)
2	Headlub	SM-HTM	5 dB(A)
3	Headlub + Turmogrease	SM-HTM + Turmogrease	14 dB(A)
4	Nikkelgrafiet coating	Nikkelgrafiet coating	booggeluid verdwenen

De resultaten dB(A) reductie tonen aan dat zowel frictieverbeteraar als smeermiddel het optreden van booggeluid kunnen verminderen. Meting no. 1 laat duidelijk zien dat het smeermiddel Turmogrease met de juiste dosering het beste effect van geluidsreductie boekt, namelijk 16 dB(A). Hoewel de bijdrage van de frictieverbeteraar Headlub en het smeermiddel van de HTM in de meting no. 2 moeilijk te onderscheiden is, is de 5 dB(A) reductie toch in hoge mate te danken aan Headlub, aangezien het booggeluid vooral bij het binnenbeen optreedt. Meting no. 3 toont aan dat een frictieverbeteraar niet in combinatie met een smeermiddel moet worden gebruikt, omdat de frictieverbeteraar de smerwerking van een smeermiddel kan verslechteren.

Onder leiding van Railinfrabeheer is een praktijkproef met een thermisch gespoten coating (Nikkel - 15% vol. grafiet) ter plaatse van een wissel uitgevoerd. De resultaten hiervan zijn ingebracht in dit onderzoek en zijn voor het overzicht toegevoegd in tabel 1. Deze coating verkeert echter nog duidelijk in het proefstadium.

Om de meetresultaten beter te kunnen beoordelen worden de resultaten ook in het frequentiedomein bestudeerd. De geluidsniveauspectra zijn weergegeven in figuur 24. Vergeleken met de referentiesituatie is Turmogrease zeer effectief in het gebied tussen 500 Hz en 10 kHz, waarin het booggeluid overheerst. Het is mogelijk dat Turmogrease het stick-slip effect inderdaad voor het grootste deel elimineert. De frictieverbeteraar Headlub is actief in het 1 - 10 kHz gebied en is in staat de booggeluid pieken enigszins te verlagen.



Figuur 24. Gemiddeld equivalent geluidsniveau voor en na modificatie wrijvingsgedrag

Overigens dient vermeld te worden dat de geluidsreductie behaald met Headlub sterk afhankelijk is van de verzadigingsgraad van de spoorstaaf met de frictieverbeteraar. Het toepassen van Headlub is het effectiefst als de dosering van de frictieverbeteraar nauwkeurig wordt gecontroleerd.

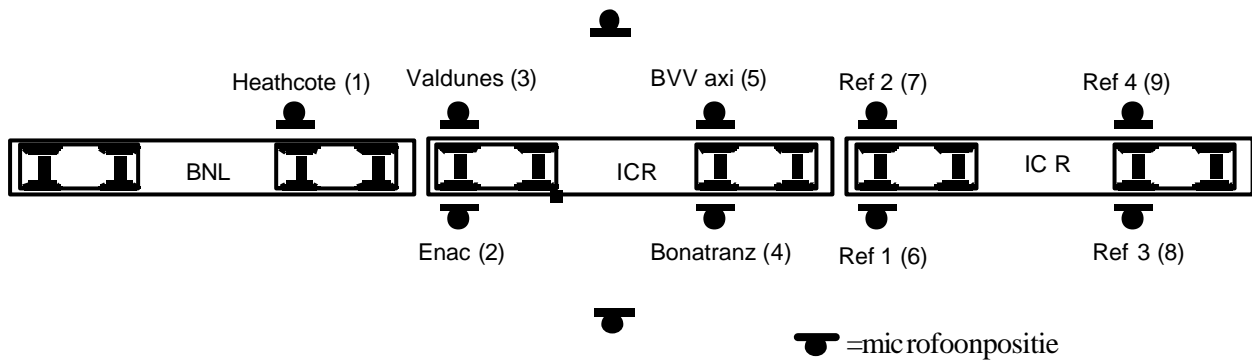
Aanvullend op de hierboven beschreven metingen zijn ook proeven uitgevoerd met opgelaste spoorstaven, met het product Eteka 5 van Elektro Thermit. Deze elektrode bevat in ieder geval 14% mangaan. Door een zachter materiaal aan te brengen zou het wrijvingsgedrag tussen wiel en rail gunstig kunnen worden beïnvloed. Op basis van de uitgevoerde metingen bij GVB-A kan worden vastgesteld dat deze maatregel geen bijdrage geeft aan de reductie van booggeluid. Kennelijk beïnvloedt de lokale materiaalwijziging het stick-slip effect tussen het wiel en de rail nauwelijks, waardoor het booggeluid niet wordt gereduceerd.

7.4 Wiel- en raildempers

Uit theoretisch oogpunt wordt verwacht dat het toepassen van wiel- en raildempers een duidelijke reductie van booggeluid kan geven. In deze paragraaf wordt de effectiviteit van deze maatregelen getoetst door middel van tweetal experimenten met speciale testtreinen. Het gebruik van de testtreinen heeft een belangrijk voordeel in vergelijking met de diensttreinen; allerlei parameters die van invloed zijn op het ontstaan van booggeluid zijn namelijk beter te controleren.

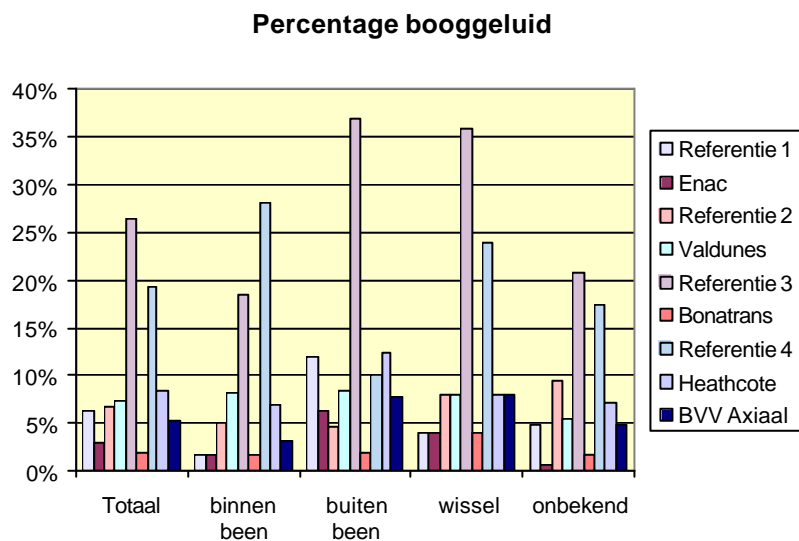
7.4.1 Metingen wioldempers

In deze studie wordt een vijftal wioldempers onderzocht aan de hand van geluidsmetingen op de trein, direct naast de draaistellen, en langs de baan ter weerszijden van het spoor. Om de metingen zo eenvoudig en zo objectief mogelijk te houden zijn de verschillende wioldempers en de microfoons gemonteerd op de wijze aangeduid in figuur 25. De meerjeddende microfoons naast de wioldempers meten de gedempte geluidsniveaus, terwijl de andere microfoons naast de ongedempte wielen zijn gebruikt om een referentiesituatie vast te leggen. De microfoons naast de baan zijn bedoeld om het totale effect te evalueren. Deze testen zijn uitgevoerd door de trein met variërende snelheid door bogen te laten rijden, zowel op emplacementen als op de hoofdbaan.



Figuur 25. Opstelling microfoons en wioldempers voor de wioldemperproeven

De resultaten in gemiddelde dB(A) niveaus tonen zeer beperkte verschillen, op basis waarvan geen onderscheid kan worden gemaakt tussen de verschillende dempers. Daarom is een ander criterium gehanteerd om de dempers te kunnen beoordelen. Het optreden van booggeluid wordt bepaald op basis van de totale tijdsduur van het optredende booggeluid per microfoon (referentiewiel of wioldemper). In figuur 26 zijn de verkregen resultaten vermeld, waarin de booggeluid tijdsduur in percentage wordt weergegeven ten opzichte van de totale reistijd van het voertuig in bogen. De effectiviteit van de wioldempers wordt beoordeeld door een vergelijking te maken tussen de wioldempers en de bijbehorende referenties. Deze referentiewielen hebben een zelfde positie in de proeftrein (Enac: Ref 1, Valdunes: Ref 2, Bonatrans: Ref 3, Heathcote en BVV Axiaal: Ref 4).



Figuur 26. Effect van wioldempers uitgedrukt in percentage (tijd) booggeluid optreedt
 Verticale as: tijdsduur booggeluid ten opzichte van totale reistijd
 Horizontale as: aandeel booggeluid van de diverse onderdelen en totaal

Ondanks de zorgvuldige uitvoering van de metingen vertonen de gemeten referenties een grote spreiding. Bij de referentiewielen 1 en 2 treedt het booggeluid alleen incidenteel op. Referentiewielen 3 en 4 geven daarentegen juist veel booggeluid, met name voor de bogen naar rechts. Het verschil tussen de wielen 1 en 2 enerzijds en 3 en 4 anderzijds trad op voor beide rijrichtingen. Omdat de referentie niet eenduidig is vast te stellen, is het effect van de wioldempers moeilijk vast te stellen. Het verdient aanbeveling om in de toekomst deze wioldempers nader te onderzoeken zodat een definitieve conclusie kan worden getrokken.

7.4.2 Metingen raildempers

Het experiment beschreven in deze paragraaf heeft als doel het effect van raildempers op booggeluid vast te stellen. Dit experiment is uitgevoerd op een recht spoor, waar raildempers zijn toegepast. De testtrein heeft een extra draaistel in het midden van de meetwagen (zie foto 7). Dit draaistel heeft drie wielstellen, waarvan het middelste wielstel volledig instelbaar is voor wat betreft de axiale kracht en hoekverdraaiing. Booggeluid wordt opgewekt door het middelste wielstel van de testtrein ten opzichte van het spoor te verdraaien. Voor de een is een maximale aanloophoek van 5 m rad aangehouden. Deze aanloophoek werd tijdens een meting constant gehouden. Het geluidsniveau wordt gemeten door microfoons die geplaatst zijn voor het middelste wielstel.



Foto 7. Dysaf meetwagen met geïnstrumenteerd meetdraaistel

Op basis van de verkregen microfoonsignalen worden de geluidsniveaus bepaald. De resultaten zijn in tabel 2 kort samengevat. Het geluidsniveau gemeten aan de linkerkant is nagenoeg gelijk aan dat aan de rechterkant. Het is merkwaardig dat de aanwezigheid van de raildempers geen enkele afname in geluidsniveau oplevert.

Tabel 2. Gemeten geluidsniveaus in dB(A) met en zonder raildempers

Meting nummer	Geluidsniveau zonder dempers		Geluidsniveau met dempers		Afname in geluidsniveau	
	links	rechts	links	rechts	links	rechts
I.1D141_001	108	107	107	106	1	1
	107	108	108	109	-1	-1
I.1D141_002	108	107	108	106	0	1
	109	108	108	108	1	0

Uit de frequentieanalyse van de microfoonsignalen blijkt dat het booggeluid één dominante frequentie van 6.8 kHz heeft. De raildempers ontwikkeld in het project Silent Track zijn ontworpen voor een optimale werking in het frequentiegebied van 500 tot 1500 Hz. De dempers hebben echter ook een dempende werking voor hogere frequenties. Dit heeft echter geen enkele reductie in booggeluid tot gevolg.

7.5 Overige nuttige bevindingen

De praktijkproeven leveren vele nieuwe inzichten in het ontstaan van booggeluid. In deze paragraaf wordt nog nader aandacht besteed aan het effect van de spoorwijdte. Voor een gedetailleerde beschrijving wordt verwezen naar de reeks uitgebrachte verslagen van het onderzoeksprogramma Booggeluid [8, 9, 10, 11, 12].

In Amsterdam (trambedrijf GVB-A) zijn booggeluidsmetingen uitgevoerd op twee locaties met hetzelfde type spoorstaaf, een identieke oplegging en een gelijk boogradius. Bij de ene boog is er geen booggeluid geconstateerd, terwijl bij de andere boog een bijzonder hoog niveau van booggeluid gemeten (22 dB(A) hoger) is. Aangezien geen wezenlijke verschillen in andere factoren te vinden zijn, mag worden aangenomen dat het uitblijven van booggeluid een gevolg is van de 7 mm kleinere spoorwijdte in de eerste boog. Met andere woorden: Booggeluid kan worden voorkomen door een kleinere spoorwijdte toe te passen. Op basis van theoretische modellen is dit is ook de verwachting. Door de verplaatsing van het contactpunt op het wiel neemt de kans op booggeluid door laterale slijp af. Het resultaat komt overeen met de effecten van een asymmetrisch railprofiel (paragraaf 7.1).

7.6 Samenvatting resultaten veldmetingen

Het vaststellen van het effect van booggeluid reducerende maatregelen is moeilijk vast te stellen, doordat het booggeluidmechanisme afhankelijkheid is van een groot aantal parameters. Het is daarom ook van belang om te constateren dat de binnen dit onderzoeksprogramma vastgestelde effecten van de maatregelen, niet noodzakelijkerwijs in alle situaties een zelfde reducerend effect hoeven hebben. Het reducerend effect is sterk afhankelijk van de situatie ter plaatse, zoals ook blijkt uit het meetprotocol [1], en de referentiemeting die kenmerkend is voor deze betreffende situatie. In tabel 3 worden de resultaten samengevat. Daarbij is ook kort aangegeven voor welke situatie de reductie is bereikt.

Tabel 3. Effectiviteit van onderzochte maatregelen

Maatregel		Maximum reductie	Toepassing
Asymmetrisch railprofiel		23 dB(A)	Tram, groefrail
Spoorwijdte verkleinen		22 dB(A)	Tram, groefrail
Verende wielen		3 dB(A)	Tram, groefrail
Wijzigen wrijvingsgedrag	Smeermiddel	16 dB(A)	Tram, groefrail
	Frictieverbeteraar	5 dB(A)	Tram, groefrail
	Oplassen spoorstaven	Geen reductie in geluidsniveau	Tram, groefrail
	Nikkel-grafiet coating	Booggeluid totaal onderdrukt	Trein, wissel
Wieldempers		Geen reductie in geluidsniveau Reductie in het optreden van booggeluid: 30%	Trein, UIC54
Raildempers		Geen reductie in geluidsniveau	Testtrein, UIC60

Aanpassing van het railprofiel (en spoorwijdte), gericht op de beïnvloeding van de locatie van het contactpunt op het wiel, geven de maximale reducties in booggeluid tot 23 dB(A). Daarnaast wordt door de maatregelen ook de frequentie van optreden van booggeluid aanzienlijk gereduceerd. Beperkte testen met raildempers laten geen reductie zien in het optredende niveau van booggeluid. Wieldempers zijn een booggeluidmaatregel met potentie. De uitgevoerde metingen hebben deze, op theorie gebaseerde verwachting, echter niet kunnen bevestigen. De metingen toonden teveel spreiding waardoor geen eenduidige conclusies konden worden vastgesteld.

Toepassing van verende wielen met hogere dempingeigenschappen kunnen het booggeluid met 3 dB(A) reduceren. Op basis van de metingen wordt echter verwacht dat de dempingeigenschappen van de geveerde wielen nog kunnen worden verbeterd, waardoor nog hogere reducties haalbaar zijn. Frictieverbeteraars geven een geluidsreductie van maximaal 5 dB(A). Deze maatregel elimineert echter niet het typische booggeluid, waardoor het effect beperkt blijft. Smering geeft wel hoge reducties tot 16 dB(A). De toepassing van smering als booggeluidmaatregel heeft echter zijn beperking in verband met de eisen voor de minimale wrijvingseisen in relatie tot veiligheid.

Aanpassing van het railprofiel en spoorwijdte hebben grote potentie. Deze maatregelen kunnen lokaal in bogen worden aangebracht. Wel is nog onvoldoende belicht in hoeverre deze maatregel de slijtage en de belasting van het spoor beïnvloedt.

8 Conclusies

Naar aanleiding van het uitgevoerde ‘Onderzoeksprogramma Booggeluid’ kunnen de navolgende conclusies opgesteld worden.

Algemeen

- Het gat in kennis op het gebied van de voorspelling van meetresultaten is door uitvoering van het onderzoek minder groot geworden, maar is nog steeds aanwezig!
- In theorie zijn veel maatregelen inmiddels onderzocht, maar in de praktijk wijkt het gedrag van de maatregel af.
- Er zijn zoveel parameters die het resultaat beïnvloeden dat er geen exact voorspellingsmodel voor de berekening van de booggeluidsemisatie op te zetten is. Wel is het mogelijk om een voorspelling te geven op de kans of geluid wel of niet optreedt.
- In begin van het project lag de primaire focus bij loopvlakgeluid (stick-slip) en was er minder aandacht voor flensgeluid. De praktijk heeft echter aangetoond dat ook het flensgeluid van belang kan zijn.

Maatregelen

- Wieldempers van verschillende typen en verschillende kwaliteit zijn beschikbaar in de markt. Uit stationaire dempingsmetingen volgt dat de ENAC en VSG demper de hoogste verliesfactor hebben voor de axiale wielmodes. Ze laten in de berekeningen zien dat de kans op booggeluid sterk wordt verkleind en dat tevens het geluidsniveau wordt gereduceerd als booggeluid optreedt.
- De wieldempers zijn tevens beproefd tijdens passagemetingen. Hieruit kunnen geen duidelijke conclusies getrokken worden.
- Fricatieverbeteraars zijn bedoeld voor aanbrenging op de railkop of wielband en mogen daarom de wrijving niet te veel verlagen. Het is belangrijk om de frictieverbeteraars goed te doseren; te weinig frictieverbeteraar heeft geen effect op booggeluid en te veel frictieverbeteraar resulteert in een verlaging van de wrijving. Fricatieverbeteraars verkleinen de kans op booggeluid zoals is aangetoond bij passagemetingen, laboratoriummetingen en berekeningen.
- Flenssmiddelen zijn bedoeld voor aanbrenging op de zijkant van de rail en/of wielflens en mogen de wrijving verlagen. Ze zijn commercieel verkrijgbaar en geven een verlaagde kans op booggeluid bij passagemetingen.
- Het asymmetrisch railprofiel is een nieuwe combinatie van een scherp railprofiel en een laterale verschuiving van de top van het railprofiel. Passagemetingen, laboratoriummetingen en berekeningen laten zien dat het asymmetrisch railprofiel de kans op booggeluid verkleint.
- Verkleining van de spoorwijdte reduceert de aanloophoek van het voorste binnenwiel en verkleint daarmee de kans op booggeluid. Dit wordt onderbouwd met passagemetingen, labmetingen en berekeningen.
- Lasercladden op rail of wiel kunnen hetzelfde effect hebben als frictieverbeteraars, al is de invloed minder sterk, zoals blijkt uit laboratoriummetingen en berekeningen.
- Geveerde wielen gedragen zich niet anders dan ongeveerde wielen in de passage metingen en metingen op de testbank.
- Raildempers hebben binnen dit project geen gemeten effect op booggeluid.

Modellering

- Er is een rekenmodel opgesteld voor booggeluid door laterale slip. Het model is gevalideerd aan de hand van metingen op de testbank. Het model is gebruikt om maatregelen tegen booggeluid te ranken op hun effectiviteit. Het model heeft tevens inzicht verschaft in het ontstaan van booggeluid door laterale slip. Mede hierdoor is het asymmetrische railprofiel tot stand gekomen.
- Het rekenmodel houdt nu nog alleen rekening met booggeluid veroorzaakt door het stick-slip fenomeen. Flensgeluid kan niet gemodelleerd worden in het huidige model.

Metingen

Veel invloedsfactoren, waaronder meteorologische factoren, kunnen booggeluidsmetingen voor de beoordeling van maatregelen verstoren. Dit probleem is op twee manieren aangepakt:

- Er is een meetprotocol opgesteld waarin een groot aantal invloedsfactoren staat beschreven en de manier waarop zij dienen te worden bepaald. Het meetprotocol is gebruikt bij het uitvoeren van passage metingen. Passagemetingen zijn verricht voor en na het installeren van maatregelen tegen booggeluid om op deze manier het effect van een maatregel te beoordelen.
- Er is een testbank ontworpen en gebouwd waarmee onder gecontroleerde omstandigheden metingen kunnen worden verricht. De testbank maakt het mogelijk om booggeluid door laterale slip op te wekken en hier metingen aan te verrichten. De testbank is gebruikt voor validatie metingen en wrijvingsmetingen. Op de testbank kan niet de beïnvloeding van de voertuigdynamica worden gemeten.

Het bovenstaande wordt samengevat in onderstaande tabel:

	Maatregel	Resultaten					Metingen	Modellering
		Berekeningen	Testbank	Veldmetingen	Prototype beschikbaar	Commercieel verkrijgbaar		
Wiel/rail contact	Wieldempers	beschikbaar	beschikbaar	> 5 dB(A)*		ja	Meetprotocol Testbank	Rekenmodel
	FRICTIEVERBETERAARS	beschikbaar	beschikbaar	3 dB(A)	ja	ja		
	Asymmetrisch railprofiel	beschikbaar	beschikbaar	23 dB(A)				
	Spoorwijdte vernauwing	beschikbaar	beschikbaar	22 dB(A)				
	Coating wiel/rail					ja		
	Geveerde wielen					ja		
	Raildempers							
Buitenwiel/flenscontact	Wieldempers			14 dB(A)	ja	ja	Meetprotocol	
	Flenssmering					ja		
	Asymmetrisch railprofiel							
	Spoorwijdte vernauwing							
	Coating wiel/trail							
	Geveerde wielen					ja		
	Raildempers					ja		
Nieuwe maatregelen								

* Resultaten konden niet op basis van metingen worden vastgesteld

9 Aanbevelingen

Naar aanleiding van het uitgevoerde ‘Onderzoekprogramma Booggeluid’ kunnen de volgende aanbevelingen worden gedaan.

Maatregelen

- In de huidige aanpak heeft de nadruk gelegen op het stick-slip mechanisme; booggeluid door laterale slip. Booggeluid wordt ook opgewekt door flenscontact, daarin dienen voor flensgeluid ook maatregelen ontwikkeld worden.
- Voor trams dient fundamenteel onderzoek uitgevoerd te worden naar de toepassingsmogelijkheden van wioldempers. Bij het GVB-A bijvoorbeeld worden de nieuwe Combino trams door Siemens als proef uitgerust met wioldempers. Daarnaast moet een duurtest worden uitgevoerd om de effecten van wioldempers onder verschillende condities goed te kunnen bepalen.
- De optimale spoorgeometrie is nog niet klaar om op grote schaal als maatregel tegen booggeluid te worden geïmplementeerd. De booggeluidsreducerende effecten van de spoorwijdte en railprofiel zijn vastgesteld in enkele testsituaties. De optimale vormgeving staat echter nog niet vast. Met name de effecten op slijtage van wiel en rail, maximale belasting en veiligheid dienen hier nog nader te worden beschouwd. Eventueel kan hierbij ook gebruik worden gemaakt van aanvullende aanpassingen in de verkanting en/of toepassing van coating. Bij de ontwikkeling van booggeluidarme spoorconstructies moet tevens flensgeluid worden betrokken.

Modellering

Het huidige rekenmodel is geschikt voor booggeluid door laterale slip. Hier zijn de volgende aanvullingen op gewenst:

- Rekenmodel voor booggeluid door flenscontact: Dit rekenmodel is essentieel om meer inzicht te krijgen in de opwekking van booggeluid bij flenscontact. Dit inzicht is noodzakelijk om nieuwe maatregelen tegen booggeluid te kunnen ontwikkelen.
- Voertuigdynamica model: Voertuigdynamicaberekeningen worden nu uitgevoerd met SIMPAC. Het is nog steeds erg tijdrovend om grote aantallen berekeningen door te voeren. Hier zou versnellingen in aangebracht kunnen worden.
- Integratie in TWINS: De rekenmodellen voor booggeluid door laterale slip en flenscontact kunnen worden geïntegreerd in TWINS zodat ze beter te gebruiken zijn voor een grotere gebruikersgroep die het softwarepakket TWINS al in bezit hebben.
- Het rekenmodel dient gezien de importantie van flensgeluid uitgebreid te worden met de modellering van wiel-flenscontact.

Metten van booggeluid

- Monitor station: Het meetprotocol stelt de geïnteresseerde in staat om de invloedsfactoren te bepalen tijdens een passagemeting. Het is helaas niet mogelijk bepaalde meteorologische omstandigheden af te dwingen. Een oplossing hiervoor is om over een langere termijn te meten waarin vanzelf de frequent voorkomende omstandigheden optreden. Om de kosten van een dergelijke lange meting te beperken zou een onbemand monitor station langs de baan of in het voertuig moeten worden geïnstalleerd. Een monitor station moet nog worden ontwikkeld.
- Testbank voor flensgeluid: Om (nieuwe) maatregelen voor flensgeluid te kunnen beproeven of om een rekenmodel voor flensgeluid te kunnen valideren moet de testbank worden aangepast voor longitudinale slip en spin slip.

Bepaling duurzame oplossingen

De demonstratie van de maatregelen in het meerjarenprogramma booggeluid is gebaseerd op veldmetingen voor enkele bogen. Het verdient sterk de aanbeveling de effectiviteit van de maatregelen vast te stellen voor een groter aantal situaties en over een langere periode. Het ligt voor de hand voor dergelijke metingen gebruik te maken van eenvoudige onbemande meetstations, zodat deze metingen eenvoudig en goedkoop kunnen worden uitgevoerd. Voor bijvoorbeeld wioldempers zou op deze wijze

een representatieve geluidsreductie kunnen worden bepaald. Op basis van aanvullende meetdata kunnen maatregelen nader worden geoptimaliseerd per situatie.

Het uiteindelijke resultaat is een duidelijke specificatie van de beste booggeluidsmaatregelen. Deze specificatie dient te worden ingevuld op de volgende aspecten:

- uitvoering; bijvoorbeeld booggeluidsarm railprofiel;
- reducerend effect; in dB(A) en frequentie van optreden;
- kosteneffectiviteit; in dB(A)/kEuro;
- duurzaamheid; in aantal as-passages;
- life cycle kosten.

De aanbevelingen kunnen als volgt worden samengevat:

	Maatregel	Resultaten					Metingen	Modellering
		Berekeningen	Testbank	Veldmetingen	Prototype beschikbaar	Commercieel verkrijgbaar		
Wiel/rail contact	Wieldempers			x	x		Monitor station	Integratie in TWINS
	Frictieverbetersaars							
	Asymmetrisch railprofiel				x	x		
	Spoorwijdte vernauwing				x	x		
	Coating wiel/rail			x	x	x		
Buitenwiel/flenscontact	Geveerde wielen						Monitor station	Rekenmodel
	Raildempers	x	x	x	x			
	Nieuwe maatregelen	x	x	x	x			
	Wieldempers	x	x	x	x			
	Flenssmering	x	x	x	x	x		
	Asymmetrisch railprofiel	x	x	x	x	x		
Wiel/rail contact	Spoorwijdte vernauwing	x	x	x	x	x	Testbank	Integratie in TWINS
	Coating wiel/rail	x	x	x	x	x		
	Geveerde wielen	x	x	x	x	x		

Literatuur

- 1 Eindrapport initialisatiefase Booggeluidonderzoek, E. van Haaren (NSTO), E. Verheijen (NSTO), F.G. de Beer (TNO-TPD), TNO-TPD & NSTO, HAG-RPT-990166 (TNO-TPD), NSTO/99/8110026/039 (NSTO), 29 november 1999
- 2 Onderzoeksprogramma Booggeluid - Fase 4: Inventarisatie en selectie van maatregelen, I.M.J. Boerrigter, NedTrain Consulting, NTC/RD/IB/9284/000207/01, versie 1.0, 24 mei 2002
- 3 Onderzoeksprogramma Booggeluid - Fase 8: Opstellen maatregelenlijst, H. de Moel, NedTrain Consulting, NTC/RD/HdM/9284/01-93991, versie 1.0, 25 juli 2001
- 4 Onderzoeksprogramma Booggeluid - Fase 9: Ontwikkelen prototype maatregelen, H. de Moel en N. van Steenis, NedTrain Consulting, NTC/RD/NvS/9284/01-242248, versie 1.0, 27 juni 2002
- 5 Model voor stick-slip-geluid bij railvoertuigen in bogen, F.G. de Beer, TNO TPD projectnummer 008.01478, 9 augustus 2000
- 6 Opstelling ten behoeve van het meten van booggeluid, P.P.Kooiman, TNO TPD, projectnummer 008.01478, 20 juli 2000
- 7 Evaluatie van maatregelen tegen booggeluid door laterale slip, F.G. de Beer, TNO TPD, projectnummer 008.01478, 1 mei 2001
- 8 Onderzoeksprogramma booggeluid, Invloed asymmetrisch railprofiel bij het trambedrijf Praktijkproeven bij GVB-A, Gerrit van Keulen, Bernard Lefranc, Wim van der Velden, AEA TR, 9110032, mei 2002
- 9 Onderzoeksprogramma booggeluid - Rapportage praktijkproeven HTM, AEA TR, Gerrit van Keulen, Bernard Lefranc, AEA TR, AEAT/02/9110032/021, mei 2002
- 10 Onderzoeksprogramma booggeluid - invloed oplassen of frictieverbeteraar. Praktijkproeven bij GVB-A en op Watergraafsmeer, Gerrit van Keulen, Bernard Lefranc, AEA TR, AEA/01/9110032/014, juli 2001
- 11 Onderzoeksprogramma booggeluid, deelproject 7, invloed van verende wielen en smeermiddel, praktijkproeven voor tram bij HTM, AEA TR, Gerrit van Keulen, Bernard Lefranc, AEA TR, AEA/01/9110032/013, juli 2001
- 12 Onderzoeksprogramma booggeluid, deelproject 7, invloed axiale kracht, aanloophoek en raildempers, praktijkproeven Sokolec Tsjechië, AEA TR, Gerrit van Keulen, Rik van Haaren AEA TR, AEA/01/9110032/013, juli 2001

Bijlage I Beschrijving maatregelen (uit de inventarisatie)

Wieldempers

Er zijn verschillende typen wieldempers. De belangrijkste wieldempertypen voor booggeluidsreductie zijn ringdempers, gelijmde dempers, sandwichdempers en plaatdempers, zie voor een schematische voorstelling de figuren 1 tot en met 4. In de literatuur is men het meest enthousiast over ringdempers, die een reductie van het booggeluid tot circa 30 dB(A) teweeg kunnen brengen. Ringdempers zijn relatief eenvoudig toe te passen. De reductie voor booggeluid van wieldempers op L_{Aeq} is 3 tot 12 dB(A).

Wieldempers kunnen ook het rolgeluid verminderen, echter hier is vaak een andere uitvoering van de wieldemper voor nodig. Of er een wieldemper bestaat die zowel boog- als rolgeluid effectief tegen gaat, is onderzocht in een VROM-onderzoek naar wieldempers. Een wieldemper dient voor een effectieve werking geoptimaliseerd te worden voor het betreffende wieltype. Wieldempers kunnen zowel bij treinen als trams ingezet worden.

Geluidsreductie

- In metingen is het effect niet echt aangetoond, desondanks is het de verwachting dat wieldempers booggeluid met meer dan 5 dB(A) kunnen reduceren.

Voordelen

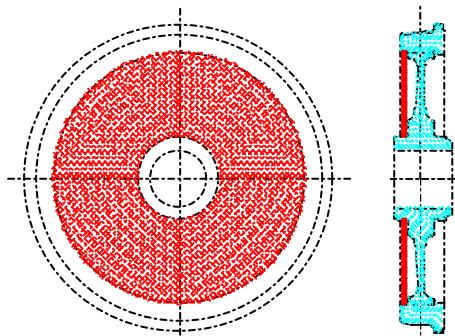
- Eventueel ook minder rolgeluid door toepassen van wieldemper, dit is in onderzoek.
- Eenvoudige constructie (ringdempers).

Nadelen

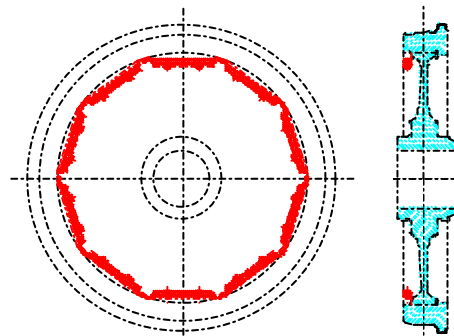
- Toevoegen van extra massa (geldt niet voor gelijmde dempers).
- Verhogen van de demping beneden 1000 Hz is moeilijk.
- Bij trambedrijven worden bepaalde typen wieldempers vaak verloren.

Kosten:

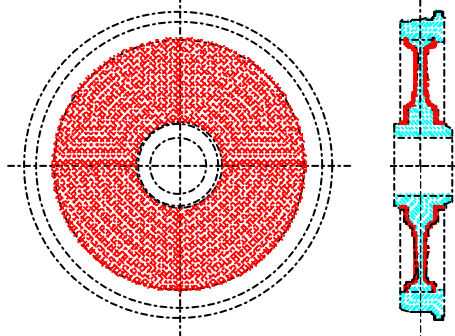
- Aanschaf inclusief inbouw: €200 tot €500 (ringdempers goedkoper: circa €100).



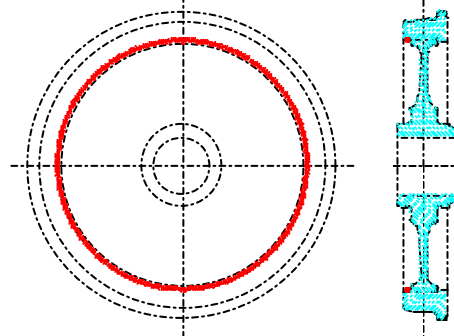
Figuur 1. Plaatdemper



Figuur 2. Sandwich demper



Figuur 3. Gelijmde demper

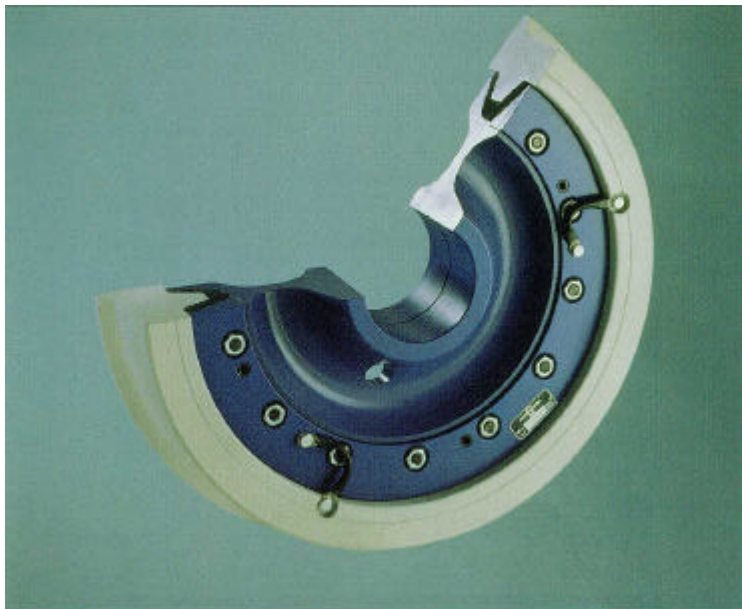


Figuur 4. Ringdemper

- Figuur 1. Demper bestaande uit een geluidsabsorberende plaat, opgebouwd uit metaal en/of polymeer, die voor het wiellijf wordt gemonteerd.
- Figuur 2. Demper bestaande uit een aantal sandwichblokken, opgebouwd uit dunne lagen van metaal en trillingabsorberende polymeer, die als geheel bevestigd wordt op de wielband.
- Figuur 3. Demper opgebouwd uit een polymere laag afgedekt met een dunne metalen laag die op het wiellijf wordt gelijmd. De weerstand tegen afschuiving in de polymere laag zorgt voor demping.
- Figuur 4. Demper bestaand uit een metalen ring, eventueel in combinatie met een tussenliggende polymere laag, die in een groef in de wielband wordt bevestigd. De wrijving tussen de ring en de wanden van de groef zorgt voor de demping.

Verende wielen

Het merendeel van de verende wielen zijn rubbergeveerde wielen: tussen wielband en wiellijf is rubber bevestigd (zie figuur 5). Verende wielen worden in de tramwereld al veelvuldig toegepast met als hoofddoel het comfort ten gevolge van stootkrachten te verminderen. In Nederland worden nog geen verende wielen bij treinen toegepast.



Figuur 5. Voorbeeld van een verend wiel (SAB V60 wiel)

Geluidsreductie

- Exacte resultaten van geveerde tramwielen ten opzichte van ongeveerde tramwielen zijn niet bekend, de verwachting is dat deze rond de 5 dB(A) kunnen liggen.

Voordeel

- Het gewicht van rubbergeveerde wielen ten opzichte van normale wielen kan lager zijn (tot circa 12% vermindering).

Nadelen

- Geen consequente geluidsreductie.
- Soms problemen met de constructie (sterktetechnisch).
- Ligt in de treinwereld gevoelig in verband met het ongeluk in Eschede (Duitsland).

Kosten

- Een nieuw verend wiel (trein) kost circa €2.000 tot €2.500.

Wijzigen wielconstructie

Dit is een verzamelnaam voor de volgende maatregelen:

- Wijzigen van de massa en/of stijfheid van het wiel, hiermee worden de trilvormen van de wielen beïnvloed. Het effect hiervan is echter gering, ook omdat de speelruimte klein is in verband met sterkte-eigenschappen die het wiel dient te hebben.
- Het vervaardigen van wielen van andere materialen, bijvoorbeeld aluminium. In de tramwereld worden op kleine schaal al wielen beproefd met een binnenwiel van aluminium. Hoewel hieraan geen booggeluidsmetingen zijn verricht is men toch positief ten opzicht van booggeluidsreductie.

Geluidsreductie

- Geen resultaten bekend.

Voordeel

- Gewichtbesparing bij inzet van aluminiumwielen.

Nadeel

- Van het resultaat van deze maatregelen is nog weinig bekend.

Kosten

- Onbekend.

Aanpassen wielprofiel

Hierbij moet gedacht worden aan conische wielprofielen en asymmetrische (bolvormige) wielprofielen zodat invloed uitgeoefend kan worden op het contactvlak tussen wiel en rail. Conische wielprofielen zouden het booggeluid elimineren, mits deze maatregel samen met andere maatregelen wordt uitgevoerd, zoals spoorverbreding, asymmetrische sporen of flexibele primaire vering/opanging. Deze maatregel is zowel voor treinen als trams interessant.

Geluidsreductie

- Niet bekend.

Voordeel

- Lage kosten.

Nadeel

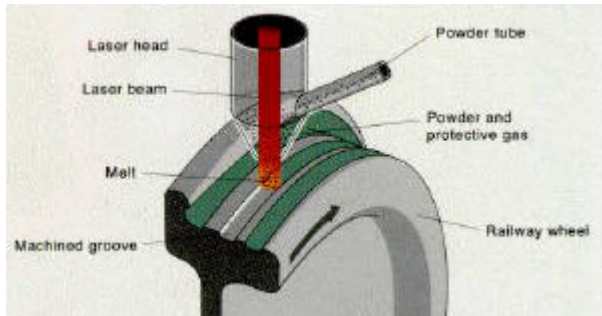
- Het is onbekend hoe snel het speciale wielprofiel zal wegslijten.

Kosten

- Wanneer het wielprofiel niet extra hard slijt hoeven er ten opzichte van het huidige wiel geen extra kosten te zijn.

Wijzigen materiaal wielloopoppervlak

Hierbij moet gedacht worden aan het opbrengen van een ander materiaalsoort op het wiel. Het betreft voornamelijk het oplassen van legeringen, ook wel 'lasercladding' genoemd. Bij lasercladding wordt een martensietpatroon op het loopvlak aangebracht (het materiaal is bijvoorbeeld een kobaltchroom legering) (zie figuur 6). Door dit patroon is de plastische vervorming van het wielloopoppervlak laag. Dit vermindert de slijtage en zou ook het geluid verminderen, zelfs elimineren. Over het resultaat van het wijzigen van het materiaal van het wielloopoppervlak is weinig bekend, behalve dat het wisselvallig is.



Figuur 6. Lasercladding

Geluidsreductie

- Niet bekend, metingen zijn mislukt.

Voordeel

- Er treedt minder slijtage op aan wiel en spoorstaaf.

Nadeel

- Legeringen op het loopvlak slijten snel. Het effect van lasercladding wordt snel teniet gedaan door gietijzeren remblokken, het gebruik van kunststof remblokken is zeer gewenst.

Kosten

- Voor prototypen circa €700 per wiel, bij serieproductie waarschijnlijk (fors) lager.

Schorten

Draaistelschorten verhinderen het ontstaan van het geluid niet, maar schermen het geluid af. Deze schorten kunnen aan het wielstel, aan het draaistel, of aan de rijtuigbak worden bevestigd. Bij de nieuwere typen trams worden ze al toegepast.

Geluidsreductie

- Draaistelschorten kunnen volgens de literatuur een geluidsreductie van 0-3 dB(A) opleveren.

Voordeel

- Relatief eenvoudige constructie.

Nadeel

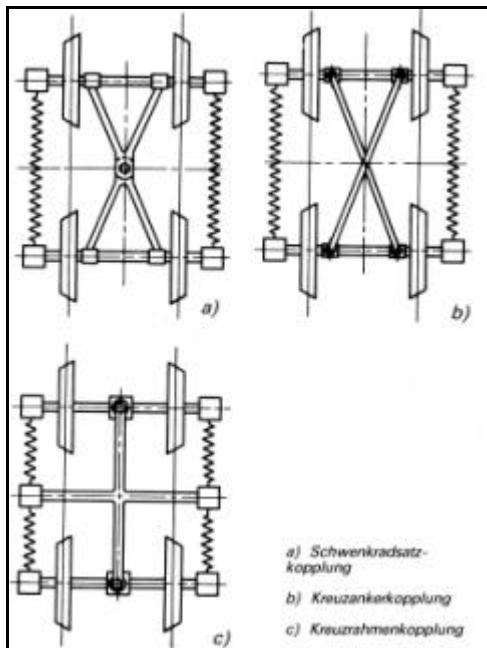
- De toegankelijkheid van het draaistel wordt slechter, bijvoorbeeld voor remblokvervangning, inspectie langs de baan of hot-box detectie (warmlopen van aslagers).
- Reductie is afhankelijk van materieel-inzet (problematisch bij treinen).

Kosten

- Voor schorten aan het wielstel zijn de kosten ongeveer: Voor het maken van de matrijs (eenmalig) circa €50.000, de schorten zelf kosten circa €250 per stuk.

Sturende assen

Sturende assen kunnen op verschillende manieren gerealiseerd worden. Het houdt voor alle gevallen in dat de twee assen in een draaistel ten opzichte van elkaar kunnen verdraaien, zodat een boog met minder zijwaartse slip doorlopen wordt. Figuur 7 geeft drie voorbeelden van een draaistel met sturende assen.



Figuur 7. Voorbeelden van draaistellen met sturende assen

Geluidsreductie

- Met sturende assen zijn geluidsreducties van 7 tot 20 dB(A) voor pieken gevonden in de literatuur, vaak werd het booggeluid geheel geëlimineerd.

Voordelen

- Minder slijtage aan wiel en rail.
- Minder ontsporingen.
- 3 tot 4 dB reductie op rolgeluid.

Nadelen

- Instabiel, slingeren, zou echter een kwestie van uitontwikkelen zijn.
- Hogere massa.
- Onderhoud moeilijker, bijvoorbeeld vervangen remblokken.
- Complexe (dure) constructie.

Kosten

10% tot 15% hogere aanschafkosten voor een draaistel. LCC kosten zouden lager uitvallen dan bij conventionele draaistellen, doordat er minder slijtage optreedt aan het draaistel.

Onafhankelijk aangedreven wielen

Het gaat om asloze draaistellen, hierbij draaien de wielen onafhankelijk van elkaar. Booggeluid zou niet meer optreden. De eerste trams met dit ontwerp gaan bij de GVB-A rijden.

Geluidsreductie

- Onbekend.

Voordeel

- Lage vloeren zijn mogelijk (trams).

Nadelen

- Nog weinig praktijkgegevens bekend.
- Alleen toe te passen bij nieuwbouw van het materieel.

Kosten

- Onbekend.

Radstand verkleinen

Hiermee worden de dwarskrachten geminimaliseerd, waardoor er minder zijwaartse slip- en booggeluid optreedt.

Geluidsreductie

- Niet bekend.

Voordeel

- Waarschijnlijk minder slijtage aan wiel en rail.

Nadelen

- Geen consequent resultaat.
- Alleen bij nieuwbouw.
- Er zijn weinig praktijkgegevens.

Kosten

- Geen extra kosten bij nieuwbouw.

Fricatieverbeteraar

Deze maatregel kan opgesplitst worden in:

- A Fricatieverbeteraar opgebracht met een mobiele installatie. Hierbij kan gedacht worden aan het opbrengen vanuit een diensttrein, een extra ingezette smeertrein of een smeerauto. Bij trambedrijven wordt er ook nog veel met de hand gesmeerd.
- B Fricatieverbeteraar opgebracht vanuit een baaninstallatie.

Een frictieverbeteraar zorgt voor een goede en constante wrijvingscoëfficiënt tussen wiel en rail. De ervaringen zijn zeer uiteenlopend.

Deze maatregel is goed toepasbaar voor zowel treinen als trams. Bij beide typen railvoertuigen wordt op dit moment volop geëxperimenteerd met frictieverbeteraars.

Geluidsreductie

- In het onderzoek is een geluidsreductie van circa 3 dB(A) gevonden, in andere onderzoeken zijn hogere reducties tot 30 dB(A) gemeten. De wisselvallige resultaten ontstaan doordat er veel verschillende typen frictieverbeteraars zijn. De resultaten met één type frictieverbeteraar kunnen echter ook wisselvallig zijn.

Voordelen

- Mogelijke adhesieverbetering waardoor er minder vlakke plaatsen optreden.
- Er treedt minder slijtage op aan wiel en rail.

Nadelen

- Kan een nadelige invloed hebben op rem- en tractievermogen.
- Vervuiling, milieuaspect.
- Onder 1000 Hz minder effectief.
- Na het opsmeren is het positieve effect vaak van korte duur, het middel moet vaak aangebracht worden.
- Opbrengen op de baan met de hand of met een speciale smeertrein is een arbeidsintensieve zaak.
- Intensief onderhoud aan de baaninstallaties.
- Mogelijke beïnvloeding van de detectie.
- Werking is afhankelijk van wiel-rail conditie.

Kosten

- Zeer uiteenlopend, zowel voor materieel als baaninstallatie als voor een smeertrein. Oorzaak hiervan is de verschillende manieren van opbrengen, het gebruikte middel en de mate van dosering van het middel. De personeelskosten van het aanbrengen van het middelen bepalen in belangrijke mate de kosten bij handmatig opbrengen. Voor baaninstallaties is dit de installatie zelf (aanschaf + onderhoud).

(Wiel)flens)smering

Deze maatregel wordt opgesplitst in:

- A (Wiel)flens)smering opgebracht met een mobiele installatie (vanuit de trein). Hierbij kan ook gedacht worden aan het opbrengen vanuit een diensttrein, een extra ingezette smeertrein of een smeerauto. Bij trambedrijven wordt er ook nog veel met de hand gesmeerd.
- B (Wiel)flens)smering opgebracht vanuit een baaninstallatie.

Bij klassieke wiel)flens)smering wordt een smeermiddel opgebracht aan de binnenkant van de flens van het wiel of aan de zijkant van de rails (binnenzijde). Een smeermiddel kan echter ook op de bovenkant van de rails worden aangebracht, waarbij de laterale beweging van wiel op de rail gesmeerd wordt. Als smeermiddel wordt grafiet vaak genoemd als zeer effectief. Deze maatregel is goed toepasbaar voor zowel treinen als trams. Er wordt al veel met (wiel)flens)smering geëxperimenteerd in Nederland.

Geluidsreductie

- In het onderzoek is een reductie van 14 dB(A) gemeten.
- Bij trambedrijven wordt soms zelfs eliminatie van het booggeluid geconstateerd met wiel)flens)smering.

Voordeel

- Reductie van rail- en flens)lijtage.

Nadelen

- Kan invloed hebben op rem- en tractievermogen bij kopsmering.
- Vervuiling, milieuaspect.
- Na het opsmeren is het positieve effect vaak van korte duur, het middel moet vaak aangebracht worden.
- Opbrengen op de baan met de hand of een speciale smeertrein is een arbeidsintensieve zaak.
- Intensief onderhoud aan de baaninstallaties.
- Mogelijke beïnvloeding van de detectie bij kopsmering.
- Werking is afhankelijk van wiel-rail conditie.

Kosten

- Baaninstallatie: circa €8.000 tot €15.000 per boog.
- Een mobiele installatie voor inbouw kost circa €8.000.

Watersproeiinstallaties

Deze maatregel valt eigenlijk onder smering (zie vorige pagina), maar wordt apart genoemd omdat het zo veelvuldig toegepast wordt. Bij het smeren met water wordt altijd gebruik gemaakt van baaninstallaties. Watersproeiinstallaties zijn interessant voor zowel treinen als trams, er lopen al veel beproevingen met watersproeiinstallaties.

Geluidsreductie

- Water blijkt een zeer effectief smeermiddel tegen booggeluid te zijn. Grote reducties (tot 20 dB(A)) en eliminatie van het booggeluid worden behaald.

Voordeel

- De detectie wordt niet beïnvloed, wanneer de hoeveelheid water geminimaliseerd wordt.

Nadelen:

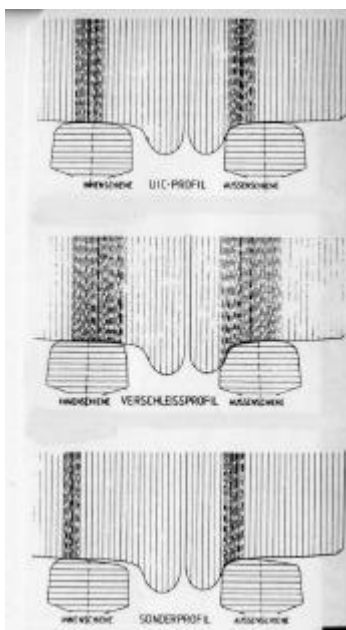
- Bevriezing in de winter, antivriesmiddelen zijn niet milieuvriendelijk. Om toch antivriesmiddelen te kunnen gebruiken, kan er bijvoorbeeld een bassin gebouwd worden om het water met antivriesmiddel op te vangen. Dit is echter een erg dure oplossing.
- Drainage van water kan problemen geven, echter de nieuwste watersproeiinstallaties minimaliseren het gebruik van water, zodat dit geen problemen meer oplevert.
- Roesten van de rails en algengroei op houten liggers, dit betekent extra onderhoud.
- Onderhoud aan de installaties.
- Lekkage / verstoppingen in de leidingen.
- Diefstal van onderdelen (tram).
- Hoge investerings- en onderhoudskosten.

Kosten

- Aanschafkosten zijn circa €30.000 per boog, onderhoud kost circa €3.000 per boog per jaar.

Asymmetrisch railprofiel

Door de rails asymmetrisch te slijpen kan het contactvlak tussen wiel en rail beïnvloed worden. Wanneer het contactvlak naar 'binnen' verplaatst wordt kan er geluidsreductie optreden. Bij de RET wordt dit toegepast: Eliminatie van booggeluid is geconstateerd. Zie figuur 8 voor een toelichting.



Figuur 8. Invloed van een asymmetrisch railprofiel, het eerste plaatje laat het normale UIC-profiel zien, het tweede plaatje laat een versleten UIC profiel zien. In het laatste plaatje is een asymmetrisch profiel afgebeeld

Geluidsreductie

- In het onderzoek zijn reducties van 23 dB(A) gemeten.

Voordeel

- Er treedt minder slijtage op aan de rails.

Nadeel

- De geslepen geometrie verdwijnt snel, meestal na enkele weken.

Kosten

- Kosten voor het slijpen liggen gemiddeld op circa €50 per meter voor beide benen samen. Bij tramspoor zal iets lager zijn, bij treinspoor iets hoger.

Restraining rails

In een boog wordt, door het toevoegen van een extra rail, de laterale bewegingsvrijheid van het wiel in de binnenboog verkleind. Hierdoor wordt de hoek tussen wiel en rail zo klein mogelijk. De wielflens dient wel gesmeerd te worden.

Geluidsreductie

- De geluidsreductie is volgens de literatuur wisselvallig.

Voordeel

- Niet bekend.

Nadeel

- Niet bekend.

Kosten

- Aanbreng: €300 tot €600 per meter.

Raildemping

Onder raildemping vallen zielblokken, dempende materialen die op de zijkant van de rails worden bevestigd (zie figuur 9) of het inbouwen van dempingelementen.



Figuur 9. Voorbeeld van raildemping

Geluidsreductie

- De reducties die bij raildemping worden gehaald lopen zeer uiteen: van bijna geen reductie tot 30 dB(A) voor pieken. Dempingelementen zijn nog niet goed uitontwikkeld geven relatief weinig reductie. Goede resultaten worden behaald met zielb lokken. Raildemping zou alleen goed effect hebben bij hoge trillingsniveaus. Deze maatregel wordt vooral bij trambedrijven toegepast. In de beperkte opzet van de raildempermetingen binnen het onderzoeksprogramma, kon geen reducerend effect van raildempers worden vastgesteld.

Voordeel

- Tevens reductie van rolgeluid.

Nadelen

- Dempingselementen blijken nog niet goed uitontwikkeld te zijn.
- Zeer wisselende resultaten.

Kosten

- €100 tot €200 per meter/per been.

Wijzigen materiaal railkop

Onder deze maatregel vallen fysisch-chemische maatregelen en het oplassen van materialen op de railkop. Deze maatregel laat soms zeer gunstige resultaten zien bij het oplassen van harde materialen: eliminatie van booggeluid in een aantal gevallen. In andere gevallen werkt het niet of minder. Ook het oplassen van zachte materialen (lood- en bronslegeringen) geeft een goed resultaat voor wat betreft booggeluid. Deze zachte materialen slijten echter zeer snel en zijn milieuonvriendelijk. Inlassen van materialen in spoorstaven is bij trams eenvoudiger dan bij treinen, omdat de spoorstaaf slapper is en er dus minder gevaar voor uitbrokkelingen is.

Geluidsreductie

- Niet bekend.

Voordeel

- Wellicht minder slijtage aan het wiel (geen praktijkgegevens).

Nadeel

- Na een aantal jaren (zo'n vijf jaar) is het materiaal weggesleten (voor zachte materialen is dit veel eerder). Bij één geval ontstonden er scheurtjes onder de oplassingen.

Kosten

- Onbekend.

Aanpassen spoorbreedte

In wijde bogen heeft een spoorverbreding een positief effect, in krappe bogen heeft een spoorvernauwing een positief effect op het booggeluid. Met deze maatregel wordt er invloed uitgeoefend op het contactvlak.

Geluidsreductie

- In het onderzoek is een reductie van 22 dB(A) gemeten.

Voordeel

- Er zijn geen extra voordelen bekend.

Nadeel

- Er zijn weinig praktijk gegevens.

Kosten

- Onbekend.

Boogstraal vergroten

Hiermee worden de dwarskrachten geminimaliseerd. Deze maatregel heeft hetzelfde effect als het verkleinen van de radstand.

Geluidsreductie

- Literatuurverwijzingen laten geen consequent resultaat zien.

Voordeel

- Er zijn geen extra voordelen bekend.

Nadelen

- In praktijk meestal niet uitvoerbaar, een boog wordt meestal al zo groot mogelijk uitgelegd.
- Er zijn weinig praktijkgegevens.

Kosten

- Onbekend.

Verkanten van de rails (en verhogen van de snelheid)

Deze maatregel zou de dwarskrachten verkleinen. Ervaring leert dat de snelheid heel hoog moet zijn en de invloed van verkanting klein is. Krappe bogen zouden juist met een lage snelheid doorlopen moeten worden.

Geluidsreductie

- Niet bekend.

Voordeel

- Er zijn geen extra voordelen bekend.

Nadeel

- Een geringe invloed.

Kosten

- Onbekend.

Afscherming langs het spoor

Hoewel dit geen bronmaatregel is, wordt deze volledigheidshalve toch genoemd.

Deze maatregel lijkt vooral toepasbaar voor treinen. Voor stadsverkeer (trams) is het minder geschikt in verband met verslechterde uitzicht en verkeerssituaties. Trams rijden vaak over 'normale' wegen.

Geluidsreductie

- Schermen leveren een geluidsreductie van 5-15 dB(A).
- Met een wal wordt 3 tot 5 dB(A) reductie gehaald, deze staan vaak wat verder van het spoor en zijn dus minder efficiënt.
- De behaalde reductie is tevens afhankelijk van de hoogte van wal of scherm. In geval van emplacementen geeft deze maatregel niet veel reductie, omdat het onmogelijk is langs elke spoorbaan een scherm of wal te plaatsen. Alleen aan de omtrek van het emplacement is dit mogelijk. Er is dan een hoog scherm om de nodige reductie te verkrijgen!

Voordeel

- Ook booggeluidsreductie.

Nadelen

- Beperking van het uitzicht (landschapsvervuiling).
- Graffitigevoelig.
- De spoorbaan is minder goed bereikbaar (voor onderhoud en dergelijke).
- Efficiëntie is afhankelijk van de afstand tussen afscherming en spoorbaan, en afhankelijk van de hoogte van de afscherming.

Kosten

- De kosten stijgen met de hoogte van de afscherming. Voor een scherm van 1 meter hoogte zijn de kosten ongeveer €5.000 per meter.

Wijzigen ondergrond

Ruwe ondergrond dempt het booggeluid ten opzichte van vlakke bodem. Voorbeelden zijn een ondergrond van gras of kiezels. Er kan ook een absorptielaag worden aangebracht. In de tramwereld wordt met deze maatregel al geëxperimenteerd.

Geluidsreductie

- Houtwolcementplaten zouden volgens de literatuur een reductie van 5 tot 6 dB(A) opleveren.

Voordeel

- Ook rolgeluidsreductie.

Nadeel

- Er zijn weinig praktijkgegevens specifiek voor toepassing bij booggeluid.

Kosten

- Onbekend.

Colofon

Uitgave: CROW, Ede
Editie: april 2003
Tekst: F.G. de Beer, TNO-TPD
R. van Haaren, AEA Technology Rail
J.J. Weener, NedTrain Consulting
Productie: CROW, afdeling Communicatie

CROW-rapport 03-03 'Maatregelen booggeluid railverkeer' is als pdf-bestand kosteloos te downloaden vanaf de website van CROW www.crow.nl (menu 'Producten en diensten'). Een papieren versie kost €30,- (incl. verzendkosten binnen Nederland). Bij CROW te bestellen onder vermelding van het artikelnummer: 03-03
per post: postbus 37, 6710 BA Ede
per fax: (0318) 62 11 12
via de website: www.crow.nl/shop