

Rapport

Haalbaarheidsonderzoek voertuiggebonden smering van het HTM tramnet

DeltaRail

Haalbaarheidsonderzoek voertuiggebonden smering van het HTM tramnet

Opdrachtgever : SGH, de heer Pieter Joosten

Uw kenmerk : SH12.6345DD263

Ons kenmerk : DeltaRail/12/120513/003

Auteur(s) : ing. Martin Hiensch
Paraaf 

Onderzoek : Leo van Hugte, ing. Martin Hiensch

Referent : dr. ir. Jaap Horst
Paraaf 

Vrijgave : ing. Martin Hiensch, senior consultant
Paraaf 

Datum : 22-11-2012

Versie : Definitief

Managementsamenvatting

In het kader van de voorgenomen invoering van voertuiggebonden smering van het contact tussen wiel en rail heeft SGH aangegeven een haalbaarheidsonderzoek te willen uitvoeren. Het doel van het haalbaarheidsonderzoek is de beantwoording van acht door SGH/HTM gestelde onderzoeksvragen. Ter beantwoording van deze vragen is gebruik gemaakt van de expertise en ervaring van de tribologische specialisten van DeltaRail, ervaringen van gebruikers (GVB, Connexion, ProRail), gesprekken met producenten van doseersystemen, gesprekken met leveranciers van smeermiddelen (Igralub, Lubcon) en literatuurstudie.

In de rapportage wordt allereerst de verzamelde achtergrondinformatie gepresenteerd op basis waarvan aansluitend de gestelde onderzoeksvragen afzonderlijk zijn beantwoord.

Op basis van de verzamelde inzichten worden de volgende conclusies getrokken:

- Voertuiggebonden smering draagt aantoonbaar bij aan de vermindering van zowel flens-booglijtage als vermindering van booggeluid. Ook het ontstaan van golflijtage kan succesvol worden tegengegaan.
- Voertuiggebonden wielflens- en railkopsmeerinstallaties kunnen onafhankelijk van elkaar worden aangebracht en aangestuurd. Op basis van de ervaringen en gesprekken met de leveranciers van smeersystemen en smeermiddelen wordt deze onafhankelijkheid als wenselijk beschouwd.
- In de Nederlandse infra (NS/ProRail/Connexion/GVB) worden voornamelijk flens- en top-of-rail producten van de firma Igralub toegepast (resp. Raillub en Headlub). Headlub 1200Mb is het enige product dat in het verleden in Nederland aan een toelatingsonderzoek is onderworpen. Hierin werd vastgesteld dat voor de toepassing van het middel Headlub op de spoorstaafkop geen aantoonbare negatieve beïnvloeding optreedt van de treindetectie, ook de kwaliteit van de ES-lassen blijft binnen specificatie. De adhesie blijft boven de grenswaarde die gehanteerd wordt voor het garanderen van veilige berijdbaarheid.
- Flenssmeersystemen dienen te worden geplaatst bij het eerste wielstel onder de vooroplopende kop. Wanneer zowel flenscontact met de railkop als met de lat/contrarail optreedt, is het zinvol om behalve de flens-binnenzijde ook de flensrug van smering te voorzien. Bij één-richtingvoertuigen kan worden volstaan met één flenssysteem per voertuig, twee-richtingmaterieel dient met twee flenssmeersystemen te worden uitgerust.
- Voor een optimaal resultaat dient Top-of-Rail (TOR) smeermiddel direct op de spoorstaafkop te worden opgebracht, de friction modifier op de rijspiegel een veel langere standtijd heeft in vergelijking met het flenssmeermiddel. Plaatsing van de TOR nozzle vindt bij voorkeur plaats tussen de wielen van een draaistel. Op deze positie heeft men minder last van turbulentie en is het opbrengstresultaat optimaal. Één TOR-doseersysteem (één nozzle per spoorstaafbeen) volstaat zowel voor één- als tweerichtingsmaterieel.
- Doel van wielflenssmearing is het aan de boog aanbieden van een geconditioneerde wielflens en daarbij de boogspoorstaaf dusdanig te conditioneren dat een smeerfilm ontstaat die een x aantal aspassages standhoudt. Ook wissels profiteren van een geconditioneerde wielflens. Voor het HTM-netwerk lijkt de meest optimale keuze voor aansturing van flenssmearing een boog-sensor (signalering van de uitdraaihoek) in combinatie met tijdsturing. Door de tijdsturing zodanig in te stellen dat na het uitlopen van de boog de flenssmearing nog enige tijd actief is wordt verzekerd dat bij het inrijden van de volgende boog een geconditioneerde wielflens wordt aangeboden.

- Aansturing van TOR-systemen vergt meer nauwkeurigheid omdat de friction modifier precies daar dient te worden opgebracht waar het probleem met booggeluid/ golfslijtage zich voordoet. In vergelijking tot flenssmering geldt voor TOR dat overdosering sneller kan leiden tot veranderend aanzet- en remgedrag. In de regel worden voor aansturing van TOR-smering geavanceerde besturingssystemen in het voertuig ingebouwd: deze combineren GPS met de outputgegevens van het voertuig zelf zodat bij wegvallen van het GPS signaal ook op basis van afgelegde weg geactiveerd kan worden.
- Op de spoorstaafkop-bovenzijde (TOR) ligt het niveau van de optredende schuifspanningen ver onder die in het flenscontact. Om deze reden is de standtijd van een geconditioneerde rijspiegel TOR veel groter dan die voor een gesmeerd flenscontact. Dit betekent dat de benodigde doseerfrequentie voor TOR veel lager ligt dan voor flenssmering. In de regel hoeft dan ook maar een klein deel van de voertuigen op een lijn met een TOR-doseerinrichting te worden uitgerust.
- In onderstaande tabel is op basis van ervaring een overzicht opgenomen van de benodigde inzetfrequentie/percentage van voertuigen per lijn voorzien van een flens- en/of TOR-smeerinstallatie. Om tot daadwerkelijke aantallen te komen dient de daadwerkelijke/ geplande materieelinzet per lijn te worden beoordeeld. Omdat TOR-smering veel minder frequent per locatie hoeft te worden aangebracht kan, bij slimme logistieke inzet, het aantal voertuigen waarop een TOR-doseerinrichting dient te worden ingebouwd beperkt blijven tot slechts enkele voertuigen.

Tabel:

Gewenst resultaat	Inzet gebied	Inzet aantal
Vermindering wielflens- en railslijtage	Krappe bogen $r < 50m$	Min. 50% van de voertuigen ingezet op de lijn voorzien van flenssmeerinstallatie.
Bestrijding booggeluid - flens		
Beheersing wrijvingscoëfficiënt op scheluwte kritische locaties	Vastgestelde scheluwte kritische locaties	Min. 50% van de voertuigen ingezet op de lijn voorzien van flenssmeerinstallatie + smeerstrippen geplaatst ruim voor de kritische locaties.
Bestrijding booggeluid - squeal	Vastgestelde squeal gevoelige locaties	10-20% van de voertuigen ingezet op een lijn voorzien van TOR-installatie. Wanneer doorsnijding van wegverkeer: 30-40% van de voertuigen ingezet op een lijn voorzien van TOR-installatie.
Bestrijding golfslijtage	Bekende locaties met golfslijtage	

Op basis van de voertuiginzet op de SGH-infra kan bovenstaande tabel vertaald worden naar exacte aantallen.

- Flenssmering wordt door SGH/HTM niet toegepast t.b.v. borging van de veilige berijdbaarheid. Ook zonder flenssmering blijven de voertuigreacties binnen de vereiste grenswaarden. Toepassing van flenssmering heeft tot doel de veiligheidsmarge van het systeem te verhogen. Een eis t.a.v. beschikbaarheid dient dan ook in dit licht te worden beschouwd.
- De toepassing van flenssmering zal leiden tot verlaging van de wrijvingskrachten tussen wiel en rail en daarmee positief bijdragen aan de standtijd van de wielflensen.

- Een voldoende gewaarborgde adhesieconditie op trajecten waarop kritische scheluwtewaarden voorkomen kan ons inziens worden bereikt a.h.v. volgende inzet: minimaal 50% van de voertuigen ingezet op de lijn voorzien van flenssmeerinstallatie aangevuld met smeerstrippen geplaatst in de railgroef van het buitenbeen, ruim voor de scheluwte kritische locaties;
- met name omdat de slijtage- booggeluid- en golfslijtageproblematiek zich op veel verschillende locaties in het HTM netwerk voordoet is voertuiggebonden dosering van smeermiddelen zeer efficiënt. Baaninstallaties zijn dit door hun beperkte rijwijdte veel minder. Inzet van speciale smerewagens biedt onvoldoende frequentie van aanbrenge.
- Het door TOR tegengaan van het ontstaan van golfslijtage zal door verlaging van de trillingsniveaus een positief effect hebben op de degradatiesnelheid en daarmee samenhangende onderhoudsintervallen van de voertuigen; met name wielaslagers en dempers.
- Wiel- en raildempers grijpen enkel in op vermindering van booggeluid. Slijtvastere wiel- en railmaterialen grijpen enkel in op de slijtvastheid van het systeem. Combinatie van deze maatregelen is kostbaar en vergt veel tijd- en inspanning.
- Handhaving van de toegestane exploitatiesnelheid ondersteunt de effectiviteit van smering wezenlijk. Aanbevolen wordt dan ook om exploitatie hiervan te doordringen.
- Het slijpen van een zgn. anti-squeal railprofiel kan op zeer squeal-gevoelige locaties het effect van top-of-rail smering ondersteunen. In combinatie met top-of-rail smering is het aanbrenge van een AS-railprofiel een sterke maatregel. Afzonderlijk heeft TOR-smering naar verwachting een sterker effect op booggeluidreductie dan toepassing van enkel het anti-squeal-railprofiel.

Inhoudsopgave

Managementsamenvatting	2
1 Inleiding	6
2 Smering in het wiel-railcontact	7
2.1 Doel van smering	7
2.2 Typen smeermiddelen	8
2.3 Toegepaste smeermiddelen in Nederland	8
2.4 Neveneffecten van smering	10
3 Treingebonden doseersystemen	12
4 Aansturing treingebonden doseersystemen	13
4.1 Flenssmering	13
4.2 Spoorstaaf-bovenzijde (TOR)	13
5 Positie op het voertuig	16
5.1 Flenssmering	16
5.2 Spoorstaaf-bovenzijde (TOR)	16
6 Inzetfrequentie	17
7 Prijs smeerinstallaties	18
8 Ervaringen bij overige gebruikers	19
8.1 GVB Amsterdam - slijtage	19
8.2 GVB Amsterdam - booggeluid	20
8.3 ProRail/ Connexxion Valleilijn	20
8.4 HTM – Citadis algemeen	21
8.5 HTM - lijn 19 (status 4 september 2012)	21
9 Beantwoording onderzoeksvragen	24
Referenties	31
Bijlage 1 –flenssmering vs. slijtageontwikkeling (spoorwijdte 1435mm)	32
Bijlage 2 –flenssmering vs. slijtageontwikkeling (spoorwijdte 1445mm)	33

1 Inleiding

In het kader van de voorgenomen invoering van voertuiggebonden smering van het contact tussen wiel en rail heeft SGH aangegeven een haalbaarheidsonderzoek te willen uitvoeren. De scope van dit onderzoek staat beschreven in de HTM Projectbrief 'Onderzoek smering op railvoertuigen' versie 04 d.d. 18 april 2012. In opdracht van SGH heeft DeltaRail een plan van aanpak (PvA) opgesteld voor uitvoering van dit haalbaarheidsonderzoek. Dit PvA bezit kenmerk DeltaRail/12/120447/002 en is 12 juli 2012 ter goedkeuring voorgelegd aan SGH en HTM. Nadat instemming over de voorgestelde aanpak werd bereikt werd 22 augustus opdracht verleend voor uitvoering van het opgestelde PvA.

Het doel van het haalbaarheidsonderzoek is de beantwoording van de acht onderzoeksvragen zoals deze gesteld zijn in paragraaf 2.2 en 2.6 van de HTM projectbrief. Hiertoe is gebruik gemaakt van de expertise en ervaring van de tribologische specialisten van DeltaRail, ervaringen van gebruikers (GVB, Connexxion, ProRail), gesprekken met producenten van doseersystemen (REBS en Dailimon), gesprekken met leveranciers van smeermiddelen (Igralub) en literatuurstudie. In voorliggende rapportage wordt allereerst de verzamelde achtergrondinformatie gepresenteerd op basis waarvan aansluitend de gestelde onderzoeksvragen afzonderlijk zijn beantwoord.

2 Smering in het wiel-railcontact

2.1 Doel van smering

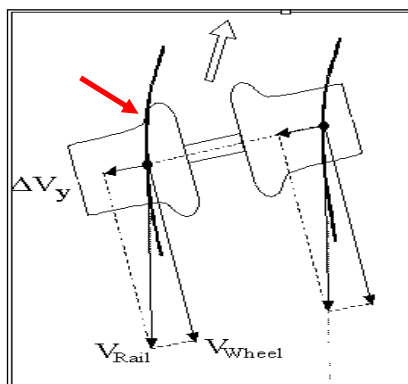
Bij het doorlopen van een voertuig door een boog zijn er drie wrijvingsprocessen die slijtage en/of booggeluid kunnen veroorzaken:

Flenswrijving; a.g.v. het aanlopen van de wielflens tegen de railkop. Wanneer een railvoertuig een krappe boog doorrijdt treedt veelal contact op tussen wielflens en railkop. Flenscontact kenmerkt zich door een hoge vlaktedruk in combinatie met hoge slipniveaus. Dit leidt tot een toename van de slijtagebelasting van zowel wielflens als railkop. De mate van slijtage is sterk afhankelijk van het optredende belastingsniveau; 'normale' milde slijtage of 'overmatige' abrasieve slijtage.

Het aanlopen van de flens tegen de spoorstaaf kan ook leiden tot initiatie van flensgeluid. Veelal kenmerkt dit geluid zich door een korte felle piep die tijdens het doorrijden van de boog veelvuldig optreedt (intermitterend). Toepassing van smering in het flenscontact heeft primair tot doel de wrijvingscoëfficiënt te verlagen en het daarmee samenhangende spanningsniveau te verlagen. Dit resulteert in verminderde slijtage en reductie in optredend flensgeluid.

Differentiële slip; het wiel in de buitenboog dient een grotere afstand af te leggen dan het wiel in de binnenboog. Wanneer de wielen star op één as bevestigd zijn resulteert dit in longitudinale slip (in langsrichting) van het wiel aan de binnenzijde. Dit kan leiden tot het ontstaan van golfslijtage op de binnenspoorstaaf (zgn. 'rutting').

Laterale (zijdelingse) slip; een draaistel bestaat uit twee evenwijdige assen. Hierdoor zullen de wielen in een boog niet exact in de richting van de spoorstaaf afrollen maar onder een kleine hoek (zgn. aanloophoek of 'angle of attack'). Door deze aanloophoek heeft de slip in het contactvlak een zijdelingse component (zie figuur 1). De zijdelingse slip op het binnenbeen leidt door stick-slip tot het in trilling komen van de wielen en de spoorstaaf en daarmee tot initiatie van squeal-booggeluid. Squeal kenmerkt zich door een luide, constante piepton tijdens het doorrijden van de boog. Smering van de rijspiegel op de bovenzijde van de spoorstaafkop (Top-of-Rail) van het binnenbeen heeft tot doel de wrijvingscoëfficiënt en daarmee de wrijvingskrachten te verlagen. De op deze positie toegepaste smeermiddelen grijpen tevens in op het wrijvingsgedrag (vorm van de wrijvingskromme) om zo het optreden van stick-slip te voorkomen. Het aangebrachte smeermiddel dient het aanzet- en remgedrag evenwel niet negatief te beïnvloeden. Smering van de rijspiegel zal slijtageprocessen die plaatsvinden op de spoorstaafkop (bijv. golfslijtage) vertragen of voorkomen.



Figuur 1: flenscontact in buitenbeen (rode pijl). De aanloophoek resulteert in zijdelingse (laterale) slip ΔV_y .

Booggeluid is dominant ten opzichte van andere geluid(deel)bronnen zoals rolgeluid of stootgeluid, bovendien liggen krappe bogen veelal in dicht bebouwde gebieden. Op grond van de aard van het optreden van booggeluid is één van de belangrijkste oplossingsrichtingen verlagings van de optredende wrijvingskrachten en het voorkomen van stick-slip door beïnvloeding van het wrijvingsgedrag.

2.2 Typen smeermiddelen

Smeermiddelen kunnen op basis van hun toepassing in de railinfra worden onderverdeeld in flenssmeermiddelen en Top-of-Rail (TOR) smeermiddelen.

Flenssmeermiddelen zijn van oudsher oliën en vetten en richten zich op vermindering van slijtage in het contactvlak tussen wielflens en railkop. Flenssmeermiddelen zijn erop gericht de wrijvingcoëfficiënt te verlagen tot een waarde van ca. 0.1. Behalve vloeibare middelen zijn er ook 'Solid Sticks' op de markt: dit is een vaste stof die tegen de wielflens gedrukt wordt. Het materiaal wordt afgezet op de flens en verlaagt de wrijving. De Kelsan HPF-sticks ('High Positive Friction') brengen de wrijvingscoëfficiënt voor zuiver rollen op een waarde van ca. 0.17 en voor gecombineerd rollen/glijden op een waarde van 0.35. HPF sticks worden met name toegepast wanneer er problemen zijn met zeer hoge adhesiewaarden (bijvoorbeeld in metro's). Doorgaans wordt voor mass-transit 25% van de wielen uitgerust. Bron: [1].

Naast flenssmering wordt ook smering op de bovenzijde van de spoorstaaf toegepast; Top-of-Rail smering (TOR). Het primaire doel hierbij is het tegengaan van squeal-booggeluid. TOR-smeermiddelen stabiliseren de wiel-railadhesie in een operationeel gebied waarbinnen remmen en optrekken gewaarborgd blijft. TOR-producten worden ook wel aangeduid als 'Rail-conditioneringsmiddelen'. Deze middelen grijpen in op het wrijvingsgedrag (gaan stick-slip tegen) en worden daarom ook wel aangeduid met de term 'Friction Modifier' (FM). FM producten bestaan uit een drager (olie of water) en vaste stof die het uiteindelijke wrijvingsgedrag bepalen. Toepassing van FM resulteert in 'positive friction' in het contact tussen wiel en rail wat inhoudt dat de wrijvingscoëfficiënt blijft toenemen met toenemend niveau van de slip. Dit levert een belangrijke bijdrage aan het voorkomen van squealgeluid. De wrijvingscoëfficiënt wordt door FM gestabiliseerd rond een waarde van 0.35.

Er zijn in de afgelopen jaren diverse publicaties verschenen waarin het positieve effect van FM op reductie van booggeluid en slijtage wordt aangetoond [4, 6, 9]. Andere publicaties [2, 5, 7] wijzen behalve op de reductie van geluid ook op de positieve bijdrage aan het tegengaan van golfslijtage, met name die optreedt in het binnenbeen van bogen (zgn. 'Rutting'). Ook het ontstaan van golfslijtage op rechtstand kan worden tegengegaan door TOR smering. Beide typen golfslijtage komen voor op het HTM netwerk.

De smeermiddelen toegepast voor flenssmering hebben een ander operationeel gebied dan die toegepast voor TOR. FM kan worden gebruikt als flenssmeermiddel maar dit wordt door de leveranciers niet geadviseerd omdat het de wrijvingscoëfficiënt in het flenscontact onvoldoende verlaagt.

2.3 Toegepaste smeermiddelen in Nederland

Door NS wordt vanaf 1978 flenssmering toegepast. De krappe bogen op de Zoetermeerlijn vormden hiertoe de directe aanleiding. Eerst met baangebonden systemen en later met Sécheron flenssmeerinstallaties ingebouwd op de SGM voertuigen. In de eerste jaren werden allerlei bitumenhoudende producten toegepast als flenssmeermiddel.

Uiteindelijk geldt het flenssmoermiddel van de firma Kajo (*Kajo Bio Tieftemperatuur fliessfet G4*) als standaard voor toepassing door NS.

Nadat de Sécheron flenssmoersystemen van de loc'n 1600 en 1700 werden gemodificeerd (rond 2005) wordt voor deze locomotieven het flenssmoermiddel Tramlub F234 toegepast.

Voor invoering is dit type smeermiddel evenwel niet in de praktijk onderzocht (er zijn geen slijtagemetingen uitgevoerd). Het smeermiddel brengt waarschijnlijk het gewenste resultaat daar ons geen problemen met overmatige flensslijtage bekend zijn. Door ProRail zijn vanaf 2007 in het kader van 'Uitvoeringsprogramma Emplacementsgeluid' op een groot aantal emplacementen baangebonden TOR-smeerinstallaties geplaatst. In deze baangebonden systemen wordt momenteel Headlub toegepast.

TOR producten zijn in het verleden ontwikkeld op basis van trial and error en zijn ook vandaag de dag nog in ontwikkeling. De friction-modifier Headlub 1200MB (fa. Igralub) is door ProRail in 2000 uitvoerig getest. De resultaten zijn vastgelegd in een testrapport [10]. De inzet van Headlub is hierbij onderzocht in combinatie met het Kajo Bio flenssmoermiddel. Geconcludeerd werd dat voor de toepassing van het middel Headlub op de spoorstaafkop geen aantoonbare negatieve beïnvloeding optreedt voor treindetectie of adhesie.

Tabel 1:

Gebruiker	Toegepast flenssmoermiddel	Producent	Toegepaste Friction Modifier voor TOR	Producent
GVB	Raillub 90 **)	Igralub		
HTM (oud)	Locolub-ECO	Fuchs		
HTM (nieuw)	Raillub 90/09	Igralub		
NS/ProRail/ Connexion	Kajo Bio Tieftemperatuur fliessfet G4	Kajo	Headlub 1200MB*) ***)	Igralub
NS	Tramlub F234 mod2	Fuchs		

*) leverancier Igralub heeft onlangs een vernieuwde versie van Headlub op de markt gebracht: Headlub 90 (aanduiding oude type is 1200MB). Volgens de producent is de receptuur gelijk gebleven evenals het percentage vaste stof (ca. 30%). Aangepast is de deeltjesgrootte van de vaste stof; deze is sterk verkleind. Dit verbetert volgens opgave de verdichting van het product en heeft een positief effect op de kwaliteit van dosering en hechting.

**) Raillub 90 wordt toegepast door GVB als flenssmoermiddel op de Combino. Raillub 90 is wat receptuur betreft overeenkomstig aan Headlub met het verschil dat het percentage vaste stof slechts 10% bedraagt. De wrijvingscoëfficiënt stabiliseert volgens opgave leverancier rond de 0.1.

***) In opdracht van Leipziger Verkehrsbetriebe (LBV) GmbH is in april 2012 een toelatingsonderzoek uitgevoerd m.b.t. invoering van TOR conditionering van tramvoertuigen. Het betreft praktijkmetingen (met name rembeproevingen) uitgevoerd aan Siemens tramvoertuigen voorzien van TOR-doseersystemen van de fabrikant REBS, in combinatie met FM van het type Headlub 90.

Geconcludeerd werd in [12]: *'dat het remvermogen van geconditioneerd spoor maximaal 13% ligt onder de waarde voor de referentiemeting. Ook bij 10-voudige dosering liggen zowel de gemeten waarden voor de remweg als voor de wrijving binnen het vereiste bereik.*

Er bestaat geen gevaar voor andere voertuigen wanneer conditionering door toepassing van mobiele doseersystemen voor trams plaatsvindt.'

2.4 Neveneffecten van smering

Treindetectie

Toepassing van smeermiddelen op de spoorstaaf is mogelijk van invloed op de kwaliteit van treindetectie. In het kader van het toelatingsonderzoek van Headlub [10] zijn daarom proeven uitgevoerd waarbij het effect is onderzocht van smering op spoorstroomloop (enkelbenig geïsoleerde 75Hz), ballastweerstand en ES-lassen. In combinatie met de TOR friction modifier Headlub is tevens het flenssmeermiddel onderzocht dat standaard door NS wordt toegepast in zowel baan-installaties als in de mobiele installaties van Sécheron op de loc'n 1600 en 1700 (flenssmeermiddel type 'Kajo Bio Tiefertemperatuur fliessfet G4'). Geconcludeerd wordt dat voor de toepassing van het middel Headlub op de spoorstaafkop geen aantoonbare negatieve beïnvloeding optreedt van de treindetectie; stroomloop, ballastweerstand en ook de kwaliteit van de ES-lassen blijft binnen specificatie. Diverse publicaties [3] zijn verschenen waarin o.a. het effect van FM op detectie/ isolatie is onderzocht voor voertuigen met relatief lage aslasten. De resultaten duiden erop dat geen problemen te verwachten zijn.

Opmerking: in het toelatingsonderzoek [10] is het effect op andere typen spoorstroomloop niet onderzocht, de verwachting wordt uitgesproken dat toonfrequente spoorstroomlopen door hun lagere voltage mogelijk meer gevoelig kunnen zijn.

Glad spoor

In het toelatingsonderzoek [10] is tevens het effect onderzocht van deze smeermiddelen op adhesie. Geconcludeerd wordt dat voor de toepassing van het middel Headlub op de spoorstaafkop geen aantoonbare negatieve beïnvloeding optreedt; de adhesie blijft boven de grenswaarde die gehanteerd wordt voor het garanderen van veilige berijdbaarheid. Tijdens de praktijkbeproeving werd een significante verlaging vastgesteld van het percentage optredend van booggeluid.

Trams maken wanneer zich tractie- of remproblemen voordoen gebruik van railremmen en/of remzand. Dit maakt dat in vergelijking met het conventionele spoor een lage adhesiewaarde voor het tramsysteem minder snel leidt tot een veiligheidskritische situatie.

Opmerking: in het toelatingsonderzoek [10] is het effect van overdosering niet onderzocht, noch de invloed van vocht/nat weer.

Remzand

Smering kan in combinatie met remzand tot problemen leiden. Wanneer zeer vette smeermiddelen worden toegepast kan na vermenging met zand een schurende pasta ontstaan. Flenssmeermiddelen die hun werking ontleen aan hun aandeel vaste stof zijn hiervoor minder gevoelig omdat de laag die op de spoorstaafkop aangebracht wordt dusdanig dun is dat zand zich hierop niet afzet. Let op: wanneer de groef vol met zand ligt zal het zand door de passerende wielflenzen langs de spoorstaafkop geschuurd worden met als gevolg dat de vaste smeerlaag wordt weggeschuurd. Het is dus zaak de groeven regelmatig schoon te maken.

Wegverkeer

Wanneer een locatie wordt doorsneden door wegverkeer treedt een onderbreking op van de conditionering. Dit geldt met name voor de TOR-conditionering. Behalve dat het op de spoorstaafkop opgebracht smeermiddel wordt weggereden vormt het wegverkeer tevens een barrière voor het uitrijdeffect (migratie van smeermiddel; afgezet smeermiddel wordt door wielen opnieuw opgenomen en verderop opnieuw afgezet). Dit betekent dat de benodigde frequentie van opbrengen van FM toeneemt voor locaties die worden doorsneden door wegverkeer; afhankelijk van de verkeersdruk kan erin resulteren dat een optimale conditionering van de TOR op enkele locaties niet kan worden bereikt.

Vervuiling wielloopvlak

Holslijtage van de wielen kan leiden tot een overmatige opbouw van de conditionering op het wielloopvlak, dit resulteert in verminderde adhesie. Hiermee dient in het afdraairegime rekening gehouden te worden.

Loopwerkconcept

Voor individueel gelagerde wielen (zonder starre as) neemt het niveau van de zijdelingse slip sterk toe waardoor dit ontwerp extra gevoelig is voor initiatie van squeal geluid. Tevens leidt dit tot een toename van de vlaktedruk in het flenscontact en daarmee tot verhoogde slijtage.

Weersinvloed

Invloed van vocht en temperatuur. De ervaring leert dat booggeluid niet optreedt onder vochtige omstandigheden (regen/mist). Water verlaagt evenals smeermiddelen de wrijvingskrachten. De toegepaste smeermiddelen zijn waterafstotend en spoelen, wanneer eerder droog te zijn opgebracht, door regen niet van de spoorstaaf. Nieuw opgespoten FM hecht zich echter niet of nauwelijks op een vochtige spoorstaafkop, tijdens regen kan dosering dan ook beter worden gestaakt. Tijdens een langdurige periode van regen zal de conditionering van de spoorstaaf deels worden afgebroken a.g.v. de wielbelasting. Het herstellen van de conditioneringslaag vergt, afhankelijk van de doseerfrequentie en belasting, tijd. Tijdens deze periode van opbouw zullen de wrijvingskrachten hoger zijn. Volgens de productbladen behouden de toegepaste smeermiddelen hun werking binnen een breed temperatuurbereik van $-30 < T < 80^{\circ}\text{C}$. Dit valt binnen het temperatuurbereik dat in de praktijk voor spoorstaven kan optreden. De ervaring leert dat niet het smeermiddel zelf maar de kwaliteit van aanbrengen gevoelig is voor extreme temperaturen.

Baantype

Met name voor trambanen geldt dat deze in het gras kunnen liggen. Een spoorstaafkop in gras blijft na een bui veel langer nat in vergelijking met een spoorstaafkop in beton of ballast. Na een periode van regen zal een goede hechting van FM hierdoor langzamer op gang komen.

Rijgedrag

Opbouw van een overmaat aan flenssmeermiddel aan de spoorstaafkop (harde korsten) kan een effect hebben op het rijgedrag op deze locatie.

Milieu

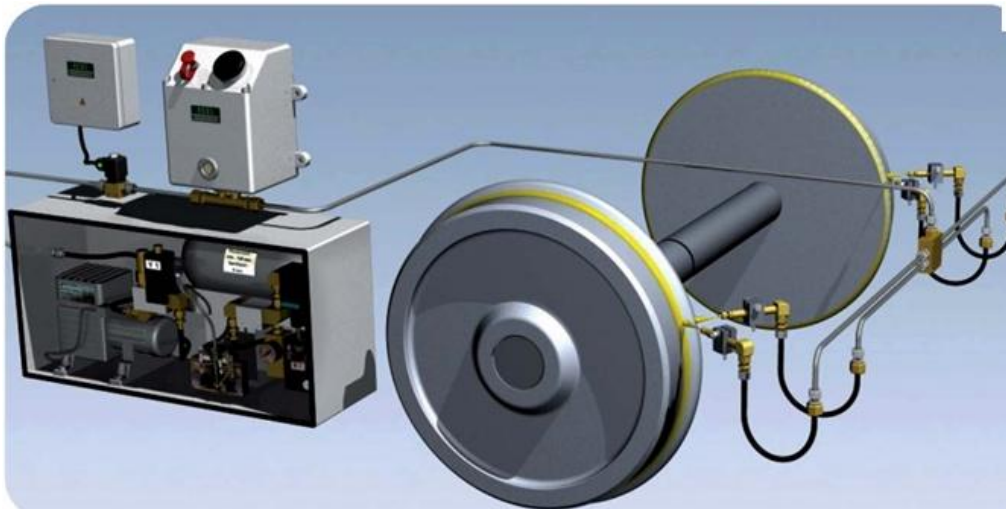
De smeermiddelen zijn biologisch afbreekbaar. Verdere aspecten zijn in deze rapportage buiten beschouwing gelaten.

3 Treingebonden doseersystemen

De systemen voor flenssmearing bestaan doorgaans uit een reservoir voor de opslag van het smeermiddel, een pompsysteem en spuitnozzles. In figuur 2 is een doseersysteem schematisch weergegeven. Alle grotere leveranciers passen het zgn. mono-tube systeem toe. Dit houdt in dat het smeermiddel vermengt met lucht door één leiding wordt gedoseerd. Het gedoseerd volume verdeelt zich gelijkmatig over de volledige spuittijd (continue uitstroom van lucht vermengd met smeermiddel). Er zijn verschillende leveranciers op de markt. Marktleiders zijn de firma REBS en Delimon. Het flenssmeesysteem van REBS is geïnstalleerd op de Combino's van het GVB en de Citadis van HTM. De Avenio trams van Siemens worden (optioneel) voorzien van smeersystemen van de firma Delimon.

De REBS en Delimon systemen zijn zeer eenvoudig en robuust van opzet, dit maakt het geschikt voor het verpompen en sprayen van de meeste type smeermiddelen: vloeibare smeermiddelen (olie), halfvloeibaar (vetten) en middelen met daarin vaste stoffen de zgn. Friction Modifiers (FM). De ervaring met andere doseersystemen leert dat deze vaak vastlopen wanneer FM wordt toegepast. Opmerking: leverancier Igralub geeft de voorkeur aan de spuit-nozzles van REBS.

De keuze voor het type reservoir hangt sterk samen met de keuze van het type smeermiddel. Wanneer deze bewaard worden onder druk treedt een verhoogde kans op olie-af scheiding (ontmenging). Bij een lange bewaartijd ont mengen overigens alle producten.



Figuur 2: doseersysteem met reservoir, pompsysteem en nozzles, hier toegepast als flenssmearinstallatie.

Het doseersysteem maakt gebruik van lucht en vereist daarmee aansluiting op een compressor. Wanneer dit niet op het voertuig kan worden gerealiseerd wordt een compressor meegeleverd. Niet vrij in te stellen zijn de luchtdruk en het slagvolume per cyclus. De minimale tijd tussen 2 doseercycli wordt veelal bepaald door de compressor (de wens deze niet te zwaar te belasten). De mono-tube systemen kunnen watergedragen FM (bijv. het middel Keltrack) niet verwerken omdat dit middel direct stolt wanneer in contact gebracht met lucht. Het stolt daardoor reeds in de leiding en leidt tot verstopping. Watergedragen middelen vereisen een duo-tube systeem (aparte lucht- en smeermiddelleiding), het opbrengresultaat is echter inferieur aan dat van mono-tube.

4 Aansturing treingebonden doseersystemen

4.1 Flenssmering

Doel van wielflenssmering is het aanbieden van een geconditioneerde wielflens aan de boog en daarbij de boogspoorstaaf zelf dusdanig te conditioneren dat een smeerfilm ontstaat die een x aantal aspassages standhoudt. Om dit te bereiken bieden leveranciers van treingebonden smeermiddel-doseersystemen een ruime keuze in aanstuurmogelijkheden. Afhankelijk van de toepassing zijn er verschillende opties. De meest toegepaste methode voor aansturing van flenssmering is de tijdgestuurde: een herhalende sequentie van x seconden aan/ x seconden uit. Deze methode is zeer geschikt voor flenssmering omdat smeermiddel zich enkel daar afzet waar flenscontact optreedt (in bogen en wissels), dosering op de wielflens in rechtstand leidt daarmee niet tot verlies. Op basis van hun ervaringen geven zowel Igralub als REBS en Delimon aan dat de aansturing o.b.v. tijdschakeling zeer efficiënt is voor een tramnet. Een alternatieve methode is activering van de flenssmeerinstallatie doormiddel van signalering van de uitdraaihoek van het vooroplopende wielstel (boog-sensor). Nadeel van deze methode is dat relatief laat wordt ingeschakeld waardoor het inloopdeel van de boog veelal ongesmeerd blijft.

Wanneer in de infra lange stukken rechtstand aanwezig zijn lijkt een combinatie van boog-sensor met tijdsturing economisch i.r.t. verbruik van smeermiddel (dosering schakelt niet in op rechtstand). Door de tijdsturing zodanig in te stellen dat na het uitlopen van de boog de flenssmering nog enige tijd actief is wordt verzekerd dat bij het inrijden van de volgende boog een geconditioneerde wielflens wordt aangeboden.

Flenssmering kan ook locatieafhankelijk worden aangestuurd m.b.v. GPS plaatsbepaling. Dit maakt locale bijsturing van het gedoseerd volume mogelijk, de aansturing zelf is meer complex dan o.b.v. tijdsturing en/of boog-sensor.

4.2 Spoorstaaf-bovenzijde (TOR)

Aansturing van TOR systemen vergt meer nauwkeurigheid omdat het middel precies daar dient te worden opgebracht waar het probleem met booggeluid/ golfslijtage zich voordoet. In vergelijking tot flenssmering geldt voor TOR dat overdosering sneller kan leiden tot veranderend aanzet- en remgedrag. Met name op een samenloopdeel dient de doseerfrequentie bewaakt te worden. Op een samenloopdeel bestaat risico op overdosering wat tot onvoldoende adhesie en daarmee tot onacceptabele exploitatierisico's kan leiden. Dit vereist een intelligente aansturing van TOR-dosering.

Aansturing van TOR kan plaatsvinden m.b.v. in de infra geplaatste transponders of met GPS. Aan transponders kunnen behalve activering van de dosering ook een zgn. 'dead time' worden meegegeven zodat deze tijdelijk wordt afgeschakeld, dit kan worden toegepast om overdosering te voorkomen. Bij aansturing door GPS vindt dosering plaats zodra een locatie is gedetecteerd. In de metro van Hong Kong als ook het emplacement Watergraafsmeer vindt TOR activering plaats door de bestuurder; bij passage van speciale borden langs de baan (zie foto 1) bedient deze een drukknop.



Foto 1: Hong Kong – de bestuurder activeert handmatig TOR-smering bij passage van het betreffende bord (geel omcirkeld).

In de regel worden voor aansturing van TOR-dosering geavanceerde besturingssystemen in het voertuig ingebouwd: deze combineren GPS met de outputgegevens van het voertuig zelf zodat bij wegvallen van het GPS signaal ook op basis van afgelegde weg geactiveerd kan worden. Met deze systemen, bijvoorbeeld de TOR-control computer van Igralub, is een geavanceerd doseringsprogramma realiseerbaar. Voorbeeld van combinatie met een voertuigsignaal: omdat bij regen TOR-dosering overbodig is wordt TOR dosering afgeschakeld tijdens inschakeling van de ruitenwissers.

Citadis HTM

De flenssmeerinstallaties van de huidige 19 Citadis worden geactiveerd door middel van boog-sensoren in combinatie met een tijdschakeling.

Combino Amsterdam

De aansturing van de flens-doseerinrichting op de Combino is tijdgestuurd in combinatie met een boogsensor. Als randvoorwaarde geldt dat niet wordt gedoseerd wanneer de voertuigsnelheid 0 is, wanneer geremd wordt of wanneer de bestuurderscabine niet is ingeschakeld. De schakeling is als volgt (opgave GVB):

Rechtspoor:	sproeitijd	6 sec.	wachttijd tussen cycli	200 sec.
In bogen:	sproeitijd	6 sec.	wachttijd tussen cycli	80 sec.
Overgang rechtspoor/boog v.v.		6 sec.	wachttijd na vorige cyclus	60 sec.

NS

De TOR doserende SGM-III treinen van NS worden aangestuurd door een centrale unit (meetkoffer). Deze meetkoffer geeft het systeem de opdracht om te doseren. Deze opdracht is afhankelijk van een opgegeven GPS-coördinaat, de ingestelde cyclustijden en de snelheid van de trein. De werking is als volgt:

1. Wanneer de treinsnelheid lager is dan 5 km/h zal de meetkoffer geen doseeropdracht geven.
2. Wanneer de snelheid hoger is dan 5 km/h zal de meetkoffer de GPS-positie van de trein vergelijken met de GPS-coördinaten in het doseerplan. Als deze overeenkomen wordt een doseeropdracht gegeven. De cyclustijd van deze doseeractie is opgegeven in het doseerplan.
3. De meetkoffer wacht tot de opgegeven cyclustijd is afgelopen en begint daarna weer met het vergelijken van de GPS-coördinaten.

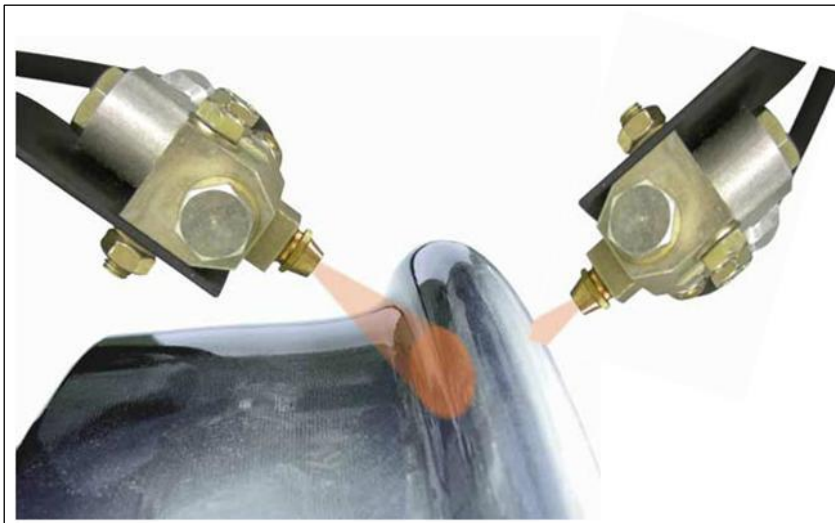
De TOR doserende SGM-III treinen hebben vier gemotoriseerde wielstellen. De motorstromen van de twee motoren onder dezelfde bak worden continue met elkaar vergeleken. Het verschil tussen deze stromen wordt gebruikt als een maat voor de hoeveelheid slip van de trein. Als dit verschil een maximumwaarde overschrijdt, wordt een slipmelding afgegeven. De eerstvolgende 60 s na de huidige cyclus wordt dan niet gedoseerd. De maximumwaarde die overschreden moet worden heet de slipdrempel.

5 Positie op het voertuig

5.1 Flenssmering

Bijlage 1 toont het effect van flenssmering; in het voorbeeld bedraagt in de ongesmeerde situatie de slijtage-index in het flenscontact 400 (deze index-waarde is een maat voor de gedissipeerde energie in het contactvlak). Dit duidt erop dat in deze situatie overmatige abrasieve slijtage zal optreden. In de gesmeerde situatie daalt de slijtage-index naar ca. 150 wat inhoudt dat milde slijtage te verwachten is. Flenssmering leidt in deze situatie tot een significante afname van zowel flens- als railkopslijtage.

In bijlage 2 is opnieuw het effect van flenssmering op slijtageontwikkeling gepresenteerd, hierbij is een spoorwijdte van 1445mm toegepast (overeenkomstig de spoorverwijding die HTM toepast in haar netwerk en in de GVB praktijk kan optreden a.g.v. flens- en railslijtage). Als gevolg van de grotere spoorwijdte neemt de maximale uitdraaihoek toe waardoor contact optreedt tussen buitenzijde wielflens en de lat/contrarail van de groefrail. Dit leidt in ongesmeerde toestand tot een zeer hoge waarde van de slijtage-index. Smering aan de buitenzijde van de flens (flensrug) reduceert de slijtagebelasting drastisch. Ook in wissels (strijkregels) profiteert men sterk van dit type smering. Omdat in het HTM netwerk flenscontact met de lat/contrarail optreedt is het zinvol om behalve de flens-binnenzijde ook de flensrug van smering te voorzien (navraag leerde dat dit op de huidige Citadis voertuigen uitgerust met flenssmering ook het geval is).



Figuur 3: principe van flenssmering vanuit het voertuig, zowel binnen- als buitenzijde flens.

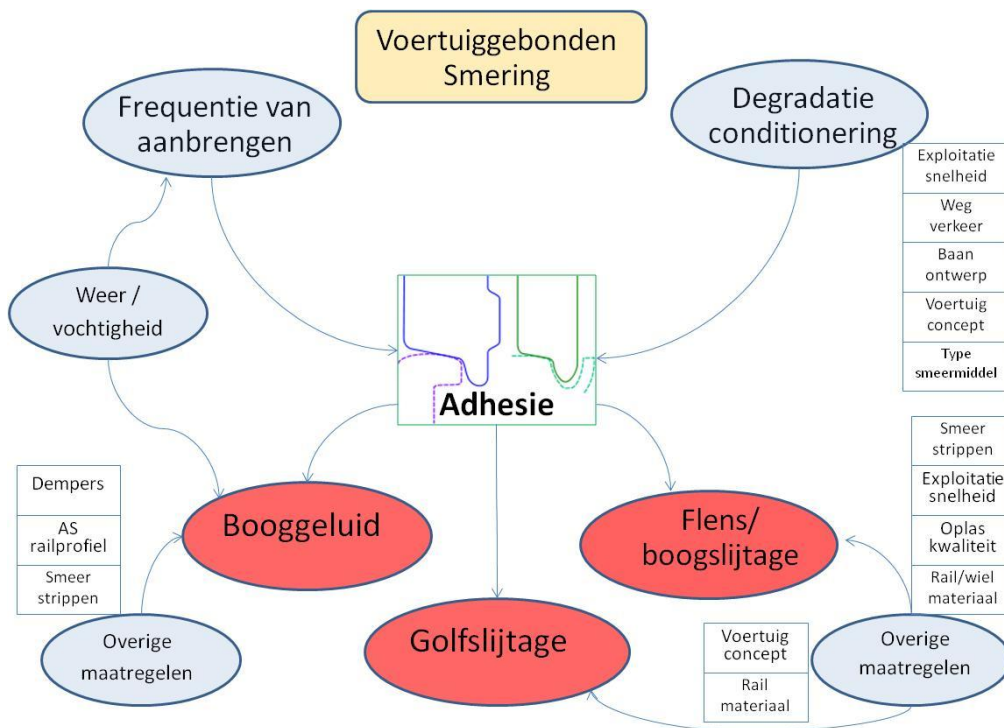
De eerste wielas van het vooroplopende draaistel wordt in de regel uitgerust met flenssmering. Op deze wijze profiteren de overige wielen van het passerende voertuig optimaal. Bij één-richtingvoertuigen kan worden volstaan met één flenssysteem per voertuig (onder de vooroplopende kop). Voor een optimaal resultaat dient dientengevolge twee-richtingmaterieel met twee flenssmeersystemen te worden uitgerust.

5.2 Spoorstaaf-bovenzijde (TOR)

Voor een optimaal resultaat dient TOR-friction modifier direct op de spoorstaafkop te worden opgebracht. FM opgebracht op de wielband zet zich onvoldoende af op de rail. De positie onder het voertuig is voor TOR-systemen minder relevant omdat de FM op de rijspiegel een veel langere standtijd heeft in vergelijking met het flenssmeermiddel. Plaatsing van de TOR-nozzle vindt bij voorkeur plaats tussen de wielen van een draaistel. Op deze positie heeft men minder last van turbulentie en is het opbrengstresultaat optimaal.

6 Inzetfrequentie

Het aantal voertuigen van de totale vloot dat met flenssmearing/TOR dient te worden uitgerust hangt sterk af van de snelheid waarmee het aangebrachte smeermiddel/ FM door passerende wielen wordt verwijderd. Dit wordt bepaald door de kwaliteit van de hechting van het smeermiddel in combinatie met de belasting die het smeermiddel ondervindt; deze hangt af van o.a. wiellast, aanzet/ remmen, snelheid en baangeometrie. Ook de mogelijkheid/wens tot bijregeling beïnvloedt het benodigde aantal doserende voertuigen (hoe snel kunnen voertuigen met flenssmearing/TOR worden bijgeschakeld wanneer de adhesieconditie hierom vraagt?). Met name voor TOR conditionering is ook het aantal doorsnijdingen door wegverkeer sterk van invloed op de doseerfrequentie (zie par. 2.3). Wanneer 100% van het materieel wordt uitgerust met flensmeerinstallaties biedt dit de optimale flexibiliteit in materieelinzet en slijtagebeheersing. Afhankelijk van de complexiteit/ flexibiliteit van het vervoerssysteem kan echter ook met minder worden volstaan.



Figuur 4: vereiste adhesie in relatie tot aanbrengen smering en beoogd effect.

TOR-dosering heeft tot doel een geselecteerd trajectdeel te voorzien van de vereiste laag FM (zgn. conditionering). De standtijd van een geconditioneerde rijspiegel TOR is veel groter dan die voor een gesmeerd flenscontact (in het flenscontact ligt het niveau van de optredende spanningen ver boven die op de spoorstaafkop). Dit betekent dat de benodigde doseerfrequentie voor TOR veel lager ligt dan voor flenssmearing. In de volgende tabel is op basis van ervaring een overzicht opgenomen van de benodigde inzetfrequentie/percentage voertuigen per lijn.

Tabel 2:

Gewenst resultaat	Inzet gebied	Inzet aantal
Vermindering wielflens- en railslijtage	Krappe bogen r<50m	Min. 50% van de voertuigen ingezet op de lijn voorzien van flenssmeerinstallatie.
Bestrijding booggeluid - flens		
Beheersing wrijvingscoëfficiënt op scheluwte kritische locaties	Vastgestelde scheluwte kritische locaties	Min. 50% van de voertuigen ingezet op de lijn voorzien van flenssmeerinstallatie + smeerstrippen geplaatst ruim voor de kritische locaties.
Bestrijding booggeluid - squeal	Vastgestelde squeal gevoelige locaties	10-20% van de voertuigen ingezet op een lijn voorzien van TOR-installatie.
Bestrijding golfslijtage	Bekende locaties met golfslijtage	Wanneer doorsnijding van wegverkeer: 30-40% van de voertuigen ingezet op een lijn voorzien van TOR-installatie.

7 Prijs smeerinstallaties

Prijsinformatie is opgevraagd bij de verschillende leveranciers (REBS en Dalimon). Afgegeven richtprijzen:

- smeerinstallatie (reservoir, pomp, nozzle) voor zowel flens als TOR ca. € 3.000,- (excl. inbouw);
- TOR-control unit (incl. GPS): ca. 7000,- (excl. inbouw, inregeling).

8 Ervaringen bij overige gebruikers

8.1 GVB Amsterdam - slijtage

GVB Amsterdam maakte in 2002 voor het eerst kennis met flenssmearing toen het Combino voertuig in exploitatie werd genomen (50% van de Combinovloot is voorzien van flenssmearing, dit betreft ca. 80 wagens/ installaties). Behalve aan de binnenzijde van de wielflens wordt tevens aan de buitenzijde van de flens smeermiddel aangebracht (vier spuitnozzles op vooroplopend wielstel). Op deze wijze wordt ook het contact met de 'lat' van de groefrail gesmeerd. Het toegepaste flenssmeermiddel is van het type 'Raillub' van de fa. Igralub. Bij invoering van de Combino werd het materieel in eerste instantie lijnsgebonden ingezet. Dit is rond 2008 verlaten.

Vanaf het moment dat de Combino werd ingevoerd in 2002 trad tot 2005 een sterke daling op in de hoeveelheid benodigd zijdelings-laswerk (volume zijdeling laswerk daalde met ca. 60%). Dit duidde op een afname van de zijdelingse belasting tussen rail en wielflens in krappe bogen. Recentelijk heeft DeltaRail in samenwerking met specialisten van GVB tram een onderzoek afgerond naar slijtage van het wiel-railsysteem. Op basis van deze analyse werd vastgesteld dat de afname van de zijdelingse railslijtage niet het gevolg was van het loopgedrag van de Combino noch van de grote instroom van nieuwe, ongesleten wielen, of infra- of exploitatiewijzigingen. Deze daling was het directe gevolg van de invoering van flenssmearing.

De flenssmeerinstallaties van de Combino vergen de nodige onderhoudsaandacht omdat het destijds toegepaste smeermiddel (Raillub 30, oud type) de neiging heeft de spuitnozzles te verstopen. Door GVB is aangegeven dat vanaf 2006 het onderhoud aan de flenssmeerinstallaties nagenoeg is stilgevallen. Als gevolg van het gebrek aan onderhoud is vanaf 2008 ca. 80% van de flenssmeerinstallaties niet meer operationeel. Vanaf het moment dat meer en meer flenssmeerinstallaties uitvallen als gevolg van achterstallig onderhoud (vanaf 2005) neemt de hoeveelheid zijdelings laswerk gestaag toe (tot in 2011 deze uitkomt op een niveau dat ca. 25% ligt boven het niveau voor de invoering van de Combino). Dit illustreert duidelijk de sterke relatie tussen flenssmearing en slijtage.

Vanaf 2008 wordt de optredende slijtage in het GVB tramnet als meer en meer problematisch ervaren; overmatige slijtage van zowel spoorstaven als wielflenzen. De onlangs afgeronde studie heeft aangetoond dat de huidige problemen rond overmatige slijtage in het wiel-railsysteem van GVB tram het gevolg zijn van het ontbreken van flenssmearing op de Combino.

Modellering

Met behulp van baan-voertuigsimulaties is getracht de invloed van flenssmearing op slijtage te kwantificeren. In bijlage 1 is voor een GVB tramtype de 'slijtage-index' berekend voor het doorrijden van een boog met een radius van 52 meter met en zonder flenssmearing. Wanneer de slijtage-index kleiner is dan 160 treedt milde slijtage op, wanneer groter dan 160 wordt een omslagpunt bereikt van milde slijtage naar abrasieve (overmatige) slijtage. Voor de beoordeelde situatie bereikt de slijtage-index voor de ongesmeerde situatie een niveau van ca. 400, voor de gesmeerde situatie daalt deze tot een waarde van ca. 80. Dit houdt in dat in de ongesmeerde situatie abrasieve en daarmee overmatige slijtage verwacht mag worden. Het effect van smearing op slijtagebeheersing is daarmee groot.

Rijsnelheid

Uit de baan-voertuigsimulaties werd tevens duidelijk dat behalve smering ook rijsnelheid sterk van invloed is op het slijtagegedrag. Op een aantal slijtagekritische locaties kan de optredende slijtage enkel significant worden verminderd wanneer behalve toepassing van flenssmearing gelijktijdig de toegestane maximum rijsnelheid niet wordt overschreden. Handhaving van de toegestane snelheid draagt derhalve sterk bij aan slijtagebeheersing.

De door SGH bestelde Avenio trams zullen op termijn de huidige GTL8 vloot gaan vervangen. De Avenio wordt geleverd door Siemens en lijkt in zijn voertuigconcept sterk op de Combino: o.a. individueel gelagerde wielen, de bak is rotatiestijf aan het draaistel, voor- en achteroplopend wiel van ieder motordraaistel elektrisch gekoppeld. De ervaringen opgedaan voor het Combino materieel lijken daarmee zeer relevant voor toekomstige verwachtingen gesteld aan het SGH wiel/railsysteem. Vanwege dit concept valt in vergelijking met het GTL8 materieel een significante toename in flenskrachten en squeal-instabiliteit te verwachten.

8.2 GVB Amsterdam - booggeluid

Voor de Combino wordt booggeluid als een groot probleem ervaren door het GVB. De individueel gelagerde wielen van de Combino staan een grote mate van dwarsslip toe in het wiel-railcontact. Als gevolg van deze hoge dwarsslip is er sprake van veel hinder door een luide, constante pieptoon tijdens het doorrijden van booglocaties (squeal-geluid). Voor de reductie van booggeluid kan een combinatie worden toegepast van een flenssmeermiddel op het buitenbeen (reductie van flensgeluid) en een frictieverbeteraar op de spoorstaafbovenzijde van het binnenbeen (Top-of-Rail) voor de reductie van squeal-geluid.

Met afnemende boogstraal neemt de aanloophoek van de wielen toe. Dit resulteert in hoge flenskrachten. Naar verwachting zal voor deze situaties het aandeel flensgeluid in het totale booggeluid significant toenemen, toepassing van flenssmearing al dan niet in combinatie met TOR smearing is noodzakelijk. Daar waar voor ruimere bogen booggeluid als een probleem wordt ervaren zal naar verwachting het aandeel squeal in het totale booggeluid dominant zijn. Op deze locaties is TOR smearing al dan niet in combinatie met flenssmearing wenselijk. GVB onderzoekt momenteel de mogelijkheid tot invoering van TOR smearing op de Combino.

8.3 ProRail/ Connexion Valleilijn

Booggeluid bestaat veelal uit een combinatie van flensgeluid afkomstig van het hoge been en squeal geluid afkomstig van het lage been. Voor de reductie van booggeluid wordt door ProRail reeds enige jaren een combinatie toegepast van een flenssmeermiddel op het buitenbeen (reductie van flensgeluid) en een frictieverbeteraar op de spoorstaafbovenzijde van het binnenbeen (TOR) voor de reductie van squeal-geluid. In het kader van het UPGE (Uitvoering Programma Geluid op Emplacementen) zijn hiertoe een zestigtal emplacementen met stationaire installaties uitgerust. Sinds 1998 wordt op emplacement Watergraafmeer een mobiele smeerinstallatie ingezet. De door ProRail gebruikte frictieverbeteraar is het middel Headlub 1200MB.

Om te onderzoeken of TOR ook op de vrije baan resulteert in een reductie van squeal is door ProRail in 2009 een pilot gestart; de WRC-pilot (Wheel-Rail-Conditioning) waar het effect van TOR onderzocht is op het traject Amersfoort – Ede Wageningen (de zgn. Valleilijn). Op deze lijn wordt door Connexion het materieeltype 'Protos' ingezet. Dit materieel (5 treinstellen) is enkel op deze lijn actief. Het smeermiddel wordt aangebracht vanuit de trein. Op elk van de treinstellen is een smeerinstallatie ingebouwd waarbij zowel flens- als TOR wordt gesmeerd.



Foto 2: voertuiggebonden Top-of-Rail (TOR) smeerinrichting.

De WRC doseertreinen van ProRail (SGM) zijn voorzien van smeerinstallatie van het bedrijf REBS Zentralschmiertechnik GmbH. Onder beide cabines is een systeem geïnstalleerd om FM (Friction Modifier) aan te brengen op de wielflens en een systeem om FM aan te brengen op de spoorstaafkop. De installaties kunnen onafhankelijk van elkaar worden bediend en ingesteld. TOR conditionering van de spoorstaafkop vindt plaats bij de cabine die op dat moment de voorkant is. Flensconditionering vindt plaats achter aan de trein. Headlub wordt door ProRail zowel toegepast op de wielflens als TOR.

De uitgevoerde geluidsmetingen gaven het volgende resultaat: daar waar voor de ongesmeerde referentiesituatie voor 44% van de treinpassages squeal-geluid optrad, is dit na conditionering door het TOR smeermiddel gedaald tot 15%. Dit is een significante afname. Vanwege de hoge onderhoudskosten van stationaire installaties langs de baan en hun beperkte reikwijdte en flexibiliteit onderzoekt ProRail samen met NS de mogelijkheid om volledig over te stappen op smering vanuit voertuigen.

8.4 HTM – Citadis algemeen

Momenteel zijn 19 Citadis HTM voertuigen uitgerust met flenssmering, de totale huidige vloot betreft 72 voertuigen. De Citadis is twee-richtingmaterieel. Elk voertuig heeft één REBS-systeem aan iedere kopzijde. Ieder smeersysteem is voorzien van vier spuitnozzles (binnen- en buitenzijde flens) op het vooroplopend wielstel. Momenteel wordt overgeschakeld naar een nieuw type smeermiddel: Raillub 90/9 van de firma Igralub.

8.5 HTM - lijn 19 (status 4 september 2012)

Op 4 september 2012 (een droge en zonnige dag) is gestart met een meetcampagne met doel inzicht te krijgen in de adhesieontwikkeling op lijn 19. Op deze lijn zijn op dat moment geen voertuigen ingezet waarop flenssmering actief is, wel wordt er op een aantal locaties flenssmering toegepast met behulp van smeerstrippen die zijn aangebracht in verschillende delen van lijn 19 (zie foto 3).



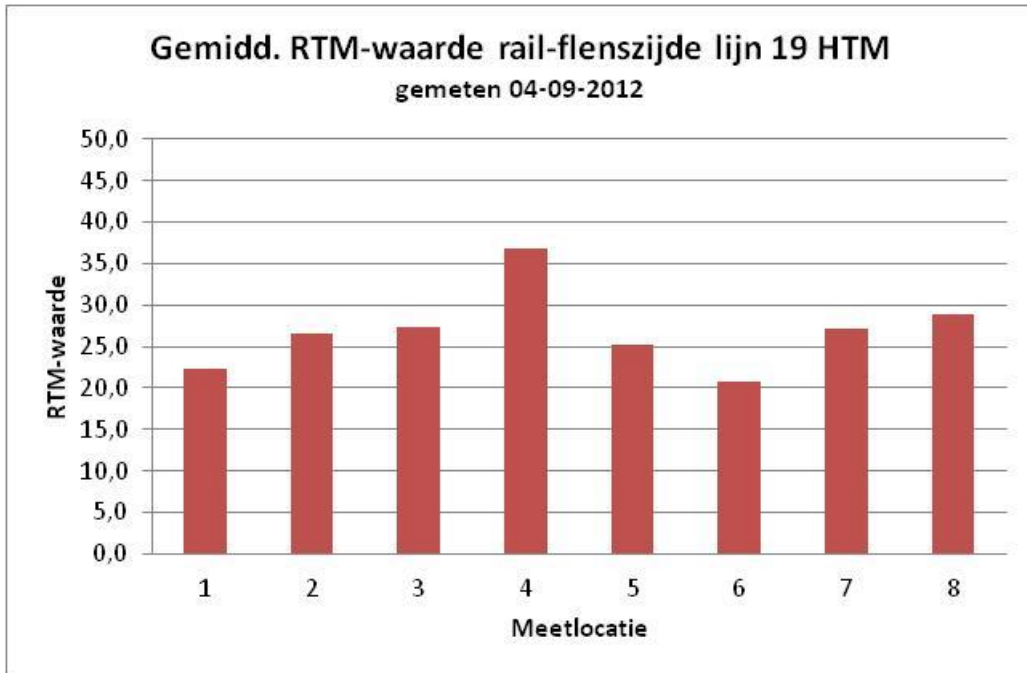
Foto 3: op diverse locaties in lijn 19 zijn delen van de groefrail (juist vóór het inrijden van krappere bogen) voorzien van smeerstrippen. Het betreft een sponsachtig materiaal verzadigd met smeermiddel; tijdens iedere wielpassage zal de passerende flens de strip indrukken waardoor zich smeermiddel op de flens zal afzetten. Dit rijdt vervolgens uit door de boog.

De uitgevoerde RailTribo-Metingen (RTM) geven een beeld van de adhesiecondities die op dat moment optreden op lijn 19. Tijdens een RTM-meting wordt een stalen wiel met een vooraf ingestelde kracht over de spoorstaafkop voortbewogen. Aan de hand van de optredende torsiekracht wordt een adhesiewaarde bepaald (RTM-waarde).

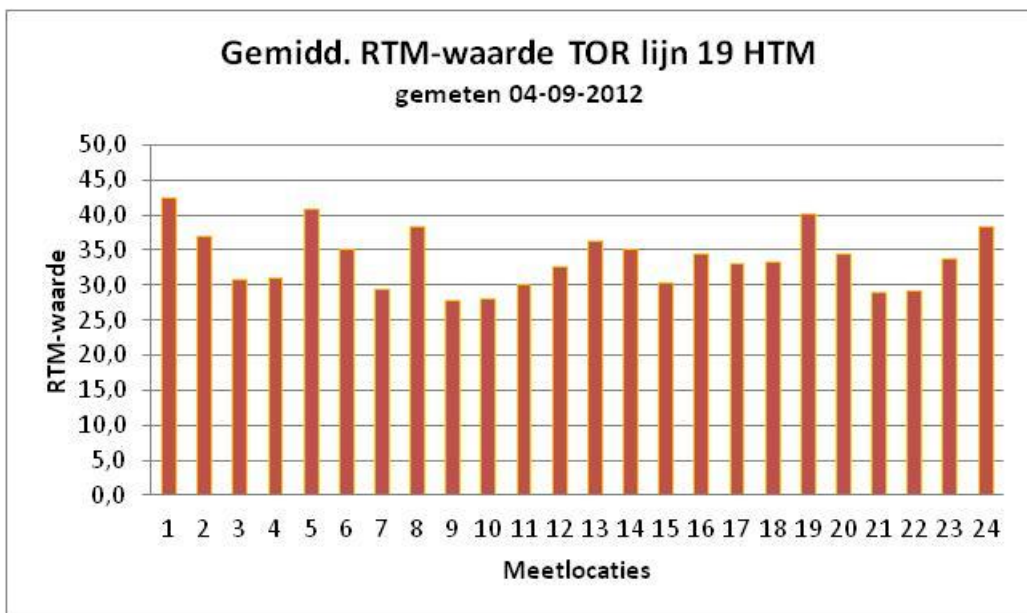


Foto 4: RailTribometer ingezet op een meetlocatie op lijn 19 (groefrail in grasbaan).

RTM-metingen zijn uitgevoerd zowel aan flenzijde (bovenbeen bogen) als aan de bovenzijde van de spoorstaafkop (zowel onder- als bovenbeen). De gemiddelde adhesiewaarde RTM aan flenzijde van de spoorstaaf liggen tussen de 20 en 25, wat duidt op de invloed van smering.



Figuur 5: gemiddelde adhesiewaarden RTM aan flenzzijde van de spoorstaaf op 8 meetlocaties op lijn 19. RTM-waarden die liggen tussen de 20 en 25 en duiden op effect van conditionering als gevolg van flenssmearing.



Figuur 6: gemiddelde adhesiewaarden RTM gemeten op bovenzijde spoorstaafkop (TOR) op 24 meetlocaties van lijn 19 (binnen- en buitenbeen). De meetwaarden liggen tussen de 30 en 40, dit duidt erop dat TOR adhesie niet of slechts ten dele door flenssmearing wordt beïnvloed.

9 Beantwoording onderzoeksvragen

De scope van het haalbaarheidsonderzoek is beschreven in onderstaande 8 onderzoeksvragen (als vastgelegd de HTM Projectbrief 'Onderzoek smering op railvoertuigen' versie 04 d.d. 18 april 2012). In dit hoofdstuk wordt op basis van de verzamelde informatie gepresenteerd in dit rapport iedere onderzoeksvraag afzonderlijk beantwoord.

1. *Wat zijn de ervaringen met betrekking tot het smeren vanuit het voertuig bij andere trambedrijven met een gelijkwaardig tramnet als Den Haag. Het betreft aantoonbare ervaringen met slijtage vermindering en reductie booggeluid.*

Slijtage

De ervaringen van GVB Amsterdam tonen aan dat, om te komen tot een beheersbare situatie rond flens- en railslijtage, flenssmering voor het Combinomaterieel onontbeerlijk is. Dit is voor een belangrijk deel gelegen in het Combino voertuigconcept; de individueel gelagerde wielen leiden tot zeer hoge flenskrachten in vergelijking met het conventionele ontwerp van een wielstel met doorlopende as. Het effect van flenssmering op railslijtage is aantoonbaar gemaakt aan de hand van de ontwikkeling van het laswerk in het GVB tramnetwerk; daling van het benodigde zijdelingse laswerk was het directe gevolg van de invoering van flenssmering. Toename was het directe gevolg van het uitvallen van de flenssmeerinstallaties a.g.v. onvoldoende onderhoud.

De door SGH bestelde Avenio trams zullen op termijn de huidige GTL8 vloot gaan vervangen. De Avenio wordt geleverd door Siemens en lijkt in zijn voertuigconcept sterk op de Combino: o.a. individueel gelagerde wielen, de bak is rotatiestijf aan het draaistel, voor- en achteroplopend wiel van ieder motordraaistel elektrisch gekoppeld. De ervaringen opgedaan voor het Combino materieel lijken daarmee zeer relevant voor toekomstige verwachtingen gesteld aan het SGH wiel/railsysteem. Vanwege dit concept valt in vergelijking met het GTL8 materieel een significante toename in flenskrachten en squeal-instabiliteit te verwachten.

Vermindering booggeluid

Booggeluid bestaat veelal uit een combinatie van flensgeluid afkomstig van het hoge been a.g.v. het aanlopen van de wielflens tegen de railkop en squeal-geluid afkomstig van het lage been a.g.v. door stick-slip geïnduceerde trillingen in het wiel-railcontact bovenop de spoorstaafkop. Voor de reductie van booggeluid wordt door ProRail reeds enige jaren een combinatie toegepast van een flenssmeermiddel op het buitenbeen (reductie van flensgeluid) en een frictieverbeteraar op de spoorstaafbovenzijde van het binnenbeen (TOR) voor de reductie van squeal-geluid. ProRail heeft aan de hand van diverse meetcampagnes het effect van deze booggeluidreducerende maatregelen aangetoond. De uitgevoerde geluidsmetingen gaven het volgende resultaat: daar waar voor de ongesmeerde referentiesituatie voor 44% van de treinpassages squeal-geluid optrad, is dit na verzadiging van het TOR smeermiddel gedaald tot 15%. Dit is een significante afname. Algemeen geldt dat de grootte van het effect afhankelijk is van de ernst van de problematiek; voor locaties met een grote instabiliteit (grote geluidsproblemen) kan het aantal voertuigpassages waarbij squeal optreedt sterk worden vermindert, voor locaties met een geringere instabiliteit kan booggeluid veelal geheel verdwijnen.

In diverse internationaal artikelen is de positieve bijdrage van flens- en TOR-smering aan het tegengaan van slijtage en booggeluid gepubliceerd. Een recent voorbeeld betreft het succesvol 'ontpiepen' van het tramnet in Bern door de toepassing van railkopsmering [9].

2. *Kunnen beide systemen (wielflens- en kopsmeerinstallatie) onafhankelijk van elkaar worden aangebracht en zonder problemen functioneren.*

Wielflens- en kopsmeerinstallaties kunnen onafhankelijk van elkaar worden aangebracht en aangestuurd. Op basis van de ervaringen en gesprekken met de leveranciers van smeersystemen en smeermiddelen wordt deze onafhankelijkheid als wenselijk beschouwd.

3. *Welk type smeermiddel is het meest optimaal voor wielflens en railkop en wielband en railkop, zonder invloed te hebben op de remsystemen en spoorbeveiligingssystemen (isolatielassen, spoorbezetmelding etc.).*

Flenssmeermiddel

Een flenssmeermiddel dient de wrijvingscoëfficiënt tussen wielflens en railkop te verlagen tot een waarde van ca. 0.1. Omdat in het trambedrijf tijdens adhesieproblemen zand wordt toegepast is het belangrijk een flenssmeermiddel te kiezen waar zand zich niet of slecht aan hecht daar anders een abrasieve pasta zou kunnen ontstaan. Op basis hiervan wordt de toepassing van zeer vette smeermiddelen afgeraden. Flenssmeerproducten die gebruik maken van oliën als drager in combinatie met vaste stof als smeermiddel voorzien de wielflens en spoorstaafkop van een dunne geconditioneerde laag waaraan zand zich minder goed hecht. Deze middelen lijken daarom het meest optimaal voor toepassing binnen het trambedrijf. Het flenssmeermiddel Raillub 90 van de firma Igralub is een voorbeeld van een flenssmeermiddel met vaste stof. Dit product wordt toegepast bij het GVB (Combino) en wordt momenteel geïntroduceerd bij de HTM. Flenssmeermiddelen zijn, wanneer correct aangebracht, niet van invloed op het remgedrag van het materieel.

TOR-friction modifier

TOR producten zijn in het verleden ontwikkeld op basis van trial and error en zijn ook vandaag nog in ontwikkeling. De friction-modifier Headlub 1200MB (fa. Igralub) is door ProRail in 2000 uitvoerig getest. De inzet van Headlub is hierbij onderzocht in combinatie met het flenssmeermiddel van NS type Kajo Bio. De resultaten zijn vastgelegd in [10]. Geconcludeerd wordt dat voor de toepassing van het middel Headlub op de spoorstaafkop geen aantoonbare negatieve beïnvloeding optreedt van de treindetectie, de kwaliteit van de ES-lassen blijft binnen specificatie. Diverse publicaties [3] zijn verschenen waarin o.a. het effect van FM op detectie/ isolatie is onderzocht voor voertuigen met relatief lage aslasten. De resultaten duiden erop dat geen problemen te verwachten zijn.

Tevens wordt in [10] geconcludeerd dat voor de toepassing van het middel Headlub op de spoorstaafkop er geen aantoonbare negatieve beïnvloeding optreedt voor de adhesie; deze blijft boven de grenswaarde die gehanteerd wordt voor het garanderen van veilige berijdbaarheid. Tijdens de praktijkbeproeving werd een significante verlaging vastgesteld van het percentage optredend van booggeluid. *Opmerking: in het toelatingsonderzoek [10] is het effect van overdosering niet onderzocht, nog de invloed van vocht/ nat weer.*

Kwetsbaarheid remsysteem

De kwetsbaarheid voor een lage waarde van de adhesie in het loopvlak tussen wiel en rail verschilt voor trams wezenlijk t.o.v. het conventionele spoor. Trams maken wanneer zich tractie- of remproblemen voordoen gebruik van railremmen en/of zand. De benodigde remweg wordt hierdoor beheerst. Dit maakt dat in vergelijking met het conventionele spoor een lage adhesiewaarde voor het tramsysteem minder snel leidt tot een veiligheidskritische situatie. Kritische adhesiewaarden dienen evenwel voorkomen te worden daar deze kunnen leiden tot een toename van het aantal snelremmingen met mogelijk letsel voor inzittenden tot gevolg.

Combinatie van flens- en TOR-producten

Het effect van verwisseling van de producten is een belangrijk aandachtspunt. Onbedoelde toepassing van een flenssmeerproduct op bovenzijde spoorstaafkop (TOR) zal leiden tot een verhoogd risico op glad spoor. Bestuurders zullen de TOR trajectdelen als glad ervaren, de verlaagde adhesie zal naar verwachting leiden tot activering van de zandstrooier met snelremmingen en/of slipbeschadigingen tot gevolg. Doordat de benodigde remweg wordt beheerst door toepassing van remzand en/of railrem leidt verwisseling naar verwachting niet direct tot een veiligheidsprobleem. Dit dient in de praktijk nader te worden vastgesteld.

4. *Waar moeten de installaties/spuitmonden worden aangebracht om een optimaal resultaat te bereiken? (bij eerste draaistel?, bij elk draaistel? bij beide wielen op één as?)*

Flenssmering

De eerste wielas van het vooroplopende draaistel wordt in de regel uitgerust met flenssmering. Op deze wijze profiteren de overige wielen van het passerende voertuig optimaal. Behalve smering aan de binnenzijde van de flens wordt wanneer in het netwerk ook contact met de contrarail/lat optreedt ook smering aan de buitenzijde van de flens (flensrug) toegepast. Dit reduceert de slijtagebelasting drastisch. Ook in wissels (strijkregels) profiteert men sterk van flensrugsmering. Omdat in het HTM netwerk flenscontact met de lat/contrarail optreedt is het zinvol om behalve de flens-binnenzijde ook de flensrug van smering te voorzien (navraag leerde dat op de huidige Citadis voertuigen uitgerust met flenssmering dit ook op deze wijze is ingericht).

Bij één-richtingvoertuigen kan worden volstaan met één flenssysteem per voertuig (onder de vooroplopende kop). Voor een optimaal resultaat dient dientengevolge twee-richtingmaterieel met twee flenssmeersystemen te worden uitgerust.

TOR-conditionering

Voor een optimaal resultaat dient TOR smeermiddel direct op de spoorstaafkop te worden opgebracht. FM opgebracht op de wielband zet zich onvoldoende af op de rail. De positie onder het voertuig is voor TOR systemen minder relevant omdat de FM op de rijspiegel een veel langere standtijd heeft in vergelijking met het flenssmeermiddel. Plaatsing van de TOR nozzle vindt bij voorkeur plaats tussen de wielen van een draaistel. Op deze positie heeft men minder last van turbulentie en is het opbrengstresultaat optimaal.

Één TOR-doseersysteem (één nozzle per spoorstaafbeen) volstaat zowel voor één- als tweerichtingsmaterieel.

5. *Waar dienen de railvoertuigen te smeren? (continue?, alleen in bogen?, in wissels?)*

Flenssmering

Doel van wielflenssmering is het aan de boog aanbieden van een geconditioneerde wielflens en tevens de boogspoorstaaf dusdanig te conditioneren dat een smeerfilm ontstaat die een x aantal aspassages standhoudt. Ook wissels profiteren van een geconditioneerde wielflens.

Flenssmeermiddel dient te worden afgezet daar waar flenscontact optreedt; flenssmering dient dus zeker tijdens bogenloop te worden geactiveerd. Omdat het flenssmeermiddel pas wordt overgedragen wanneer er sprake is van contact tussen wielflens en railkop kan de wielflens ook in rechtstand reeds van smeermiddel worden voorzien zonder dat verlies optreedt.

De voor stadstram meest toegepaste methode voor aansturing van flenssmering is de tijdgestuurde: een herhalende sequentie van x seconden aan/x seconden uit.

Een alternatieve methode is activering van de flenssmereininstallatie doormiddel van signalering van de uitdraaihoek van het vooroplopende wielstel (boog-sensor). Nadeel van deze methode is dat relatief laat wordt ingeschakeld waardoor het inloopdeel van de boog veelal ongesmeerd blijft. Wanneer in de infra lange stukken rechtstand aanwezig zijn lijkt een combinatie van boog-sensor met tijdsturing economisch i.r.t. verbruik van smeermiddel (dosering schakelt niet in op rechtstand). Door de tijdsturing zodanig in te stellen dat na het uitlopen van de boog de flenssmering nog enige tijd actief is wordt verzekerd dat bij het inrijden van de volgende boog een geconditioneerde wielflens wordt aangeboden.

TOR-conditionering

Aansturing van TOR systemen vergt meer nauwkeurigheid omdat het middel precies daar dient te worden opgebracht waar het probleem met booggeluid/ golfslijtage zich voordoet. In vergelijking tot flenssmering geldt voor TOR dat overdosering sneller kan leiden tot veranderend aanzet- en remgedrag. Met name op een samenloopdeel dient de doseerfrequentie bewaakt te worden. Op een samenloopdeel bestaat risico op overdosering wat met name i.r.t. TOR tot onvoldoende adhesie en daarmee tot onacceptabele exploitatierisico's kan leiden. Dit vereist een intelligente aansturing van TOR-dosering.

Aansturing van TOR kan plaatsvinden m.b.v. in de infra geplaatste transponders of met GPS. Aan transponders kunnen behalve activering van de dosering ook een zgn. 'dead time' worden meegegeven zodat deze tijdelijk wordt afgeschakeld, dit kan worden toegepast om overdosering te voorkomen. Bij aansturing door GPS vindt dosering plaats zodra een locatie is gedetecteerd. In zowel HongKong als emplacement Watergraafsmere vindt TOR activering plaats door de bestuurder; bij passage van speciale borden langs de baan bedient deze een drukknop.

In de regel worden voor aansturing van TOR geavanceerde besturingssystemen in het voertuig ingebouwd: deze combineren GPS met de outputgegevens van het voertuig zelf zodat bij wegvallen van het GPS signaal ook op basis van afgelegde weg geactiveerd kan worden. Met deze systemen, bijvoorbeeld de TOR-control computer van Igralub, is een geavanceerd doseringsprogramma realiseerbaar. Een voorbeeld van combinatie met een voertuigsignaal: omdat bij regen TOR dosering overbodig is wordt dosering afgeschakeld tijdens inschakeling van de ruitenwissers.

6. *Uitgaande van de type voertuigen en de kenmerken van het Haagse tramnet is de vraag hoeveel railvoertuigen moet worden uitgerust met wielflens- en wielbandsmering om in het gehele tramnet een effectief resultaat/ effect te krijgen op:*
- a) het verminderen van wiel- en rail slijtage;*
 - b) de bestrijding van booggeluid;*
 - c) de vermindering van golfslijtage;*
 - d) De wrijvingscoëfficiënt tussen de 0,2 en 0,3 te beheersen (en daarmee de scheluwte eis te kunnen verruimen).*

Het aantal voertuigen van de totale vloot dat met flenssmering/TOR dient te worden uitgerust hangt sterk af van de snelheid waarmee het aangebrachte smeermiddel/ FM door passerende wielen wordt verwijderd. Dit wordt bepaald door de adhesie van het smeermiddel in combinatie met de belasting die het smeermiddel ondervindt; deze hangt af van o.a. wiellast, aanzet/ remmen, snelheid, baangeometrie (ook de ernst van de slijtage- geluidproblematiek is hieraan vaak direct gerelateerd). Ook de mogelijkheid tot bijregeling en gewenste reactietijd beïnvloeden het benodigde aantal doserende voertuigen (hoe snel kunnen voertuigen met flenssmering/TOR worden bijgeschakeld wanneer de adhesieconditie hierom vraagt?).

Met name voor TOR conditionering is ook het aantal doorsnijdingen door wegverkeer sterk van invloed op de doseerfrequentie (zie par. 2.3).

Wanneer 100% van het materieel wordt uitgerust met flenssmeer-installaties biedt dit de optimale flexibiliteit in materieelinzet en slijtagebeheersing. Afhankelijk van de complexiteit van het systeem kan echter ook met minder worden volstaan.

TOR dosering heeft tot doel een geselecteerd trajectdeel te voorzien van de vereiste laag FM (zgn. conditionering). De standtijd van een geconditioneerde rijspiegel TOR is veel groter dan die van een gesmeerd flenscontact (in het flenscontact ligt het niveau van de optredende spanningen ver boven die op de spoorstaafkop-bovenzijde). Dit betekent dat de benodigde doseerfrequentie voor TOR veel lager ligt dan voor flenssmering. In onderstaande tabel is op basis van ervaring een overzicht opgenomen van de benodigde inzetfrequentie/percentage voertuigen per lijn.

Tabel:

Gewenst resultaat	Inzet gebied	Inzet aantal
Vermindering wielflens- en railslijtage	Krappe bogen $r < 50\text{m}$	Min. 50% van de voertuigen ingezet op de lijn voorzien van flenssmeerinstallatie.
Bestrijding booggeluid - flens		
Beheersing wrijvingscoëfficiënt op scheluwte kritische locaties	Vastgestelde scheluwte kritische locaties	Min. 50% van de voertuigen ingezet op de lijn voorzien van flenssmeerinstallatie + smeerstrippen geplaatst ruim voor de kritische locaties.
Bestrijding booggeluid - squeal	Vastgestelde squeal gevoelige locaties	10-20% van de voertuigen ingezet op een lijn voorzien van TOR-installatie.
Bestrijding golfslijtage	Bekende locaties met golfslijtage	Wanneer doorsnijding van wegverkeer: 30-40% van de voertuigen ingezet op een lijn voorzien van TOR-installatie.

Op basis van de voertuiginzet op de SGH-infra kan bovenstaande tabel vertaald worden naar exacte aantallen.

7. *Welke eis dient aan de beschikbaarheid van het wielflens- en kopsmeersysteem te worden gesteld om, indien mogelijk, de verruiming van de scheluwte eis conform vraag 6 d) te realiseren en waarbij de railveiligheid blijft gewaarborgd.*

De resultaten van de uitgevoerde simulaties [11] laten zien dat flenssmering niet wordt toegepast t.b.v. borging van de veilige berijdbaarheid. Ook zonder flenssmering blijven de voertuigreacties binnen de vereiste grenswaarden. Toepassing van flenssmering heeft tot doel de veiligheidsmarge van het systeem te verhogen. Een eis t.a.v. beschikbaarheid dient dan ook in dit licht te worden beschouwd.

De intensiteit van flenssmering hangt samen met conditie (ruwheid) van de gesmeerde oppervlakten. Wanneer de belasting van de contactvlakken dusdanig hoog is dat zelfs in gesmeerde toestand verruiming optreedt is het zinvol om iedere tram die passeert te laten smeren. De toegestane rij snelheid (en handhaving hiervan) is sterk van invloed op de optredende belasting en daarmee ook de effectiviteit van flenssmering. Het is daarom belangrijk ook exploitatie hiervan bewust te maken. Additionele toepassing van smeerstrippen als toegepast op lijn 19 maakt het systeem rond flenssmering meer robuust. E.a. is daarmee locatieafhankelijk.

Een voldoende gewaarborgde adhesieconditie op trajecten waarop kritische scheluwte voorkomt wordt ons inziens bereikt a.h.v. volgende inzet: minimaal 50% van de voertuigen ingezet op de lijn voorzien van flensmeerinstallatie + smeerstrippen geplaatst ruim voor de scheluwte kritische locaties.

8. *Zijn er andere systemen of alternatieven voorhanden die een betere en efficiëntere werking bewerkstelligen dan smering vanuit het railvoertuig en waarbij de investering- en onderhoudskosten in redelijke verhouding staan tot het aanbrengen en onderhouden van wielflens- en kopsmeerinstallaties.*

Alternatief	Voordeel	Nadeel	Beoordeling i.r.t. voertuiggebonden smering
Vaste baan smeerinstallaties	Gerichte lokale inzet.	Enkel lokale dekking, minder efficiënt wanneer meerdere probleemlocaties, vandalisme gevoelig, niet overal plaatsbaar, beperkte reikwijdte per systeem. Uitrijdeffect kwetsbaar bij doorsnijding wegverkeer.	Baaninstallaties zijn minder efficiënt met name omdat de slijtage- en booggeluid-problematiek zich op veel locaties in het HTM netwerk voordoet.
Smeerwagen	flexibele inzet	Lage frequentie in vergelijking met voertuig- en baansystemen. Hoge exploitatiekosten.	Frequentie van opbrengen is te laag; met name slijtage- en scheluwtebeheersing.
HPF flenssmering d.m.v. vaste sticks	Eenvoudig systeem op 25% van de wielen.	Verlaagt in flenscontact de wrijvingscoëfficiënt onvoldoende.	Minder geschikt voor tram-netwerk omdat het de wrijvingscoëfficiënt onvoldoende verlaagt.
Anti Squeal railprofiel	Relatief eenvoudig aan te brengen (slijpen)	Het profiel slijt weg en dient dus te worden onderhouden. Wanneer de squeal instabiliteit groot is zijn aanvullende maatregelen nodig om squeal volledig tegen te gaan.	Op zeer squeal-gevoelige locaties ondersteunt het TOR; de combinatie is een sterke maatregel.
Wieldempers	Eenvoudig aan te brengen.	Heeft enkel effect op booggeluid. Duur, op alle wielen is een demper noodzakelijk.	Beperkte reikwijdte (enkel effect op geluid, doet niets aan slijtage).
Raildempers	Eenvoudig aan te brengen.	Heeft enkel effect op booggeluid. Reductie is gering (ca. 2 db). Enkel locatiedekking.	Beperkte reikwijdte (enkel effect op geluid, doet niets aan slijtage).
Slijtvaste wiel- en railmaterialen,	Vergroot de slijtageweerstand van het systeem.	Heeft enkel effect op slijtage, doet niets aan booggeluid. Implementatie vergt lange tijd en hoge kosten.	Beperkte reikwijdte (enkel effect op slijtage, doet niets aan booggeluid).
Voertuiggedrag	Doorlopende as/ draaikrans: verlaging flenskrachten en stick-slip.	-	Niet realiseerbaar voor bestaand Citadis materieel.
Exploitatie-snelheid	Eenvoudig te handhaven.	Bestuurders zijn minder flexibele t.a.v. rijtijden.	Ondersteunt de effectiviteit van smering wezenlijk.

In paragraaf 2.6 van de HTM projectbrief worden enkele aandachtspunten geïntroduceerd waarvan verzocht wordt deze ook tot de scope van het haalbaarheidsonderzoek te rekenen. Het betreft de onderhoudbaarheid en de LCC van de apparatuur op de voertuigen.

De ervaring van het GVB met de onderhoudbaarheid van de REBS flenssmeerinstallaties leert dat met name verstopping van de nozzles problemen veroorzaakten. Dit lijkt door het GVB te zijn opgelost door toepassing van het verbeterde flenssmeermiddel Raillub 90. Het verbruik van het smeermiddel is zeer gering; ervaring bij het GVB leert dat een voertuig reeds meerdere malen voor onderhoud binnen zal zijn geweest voordat een afgevuuld reservoir leeg raakt. Desgewenst kan overschrijding van het minimale niveau elektronisch worden gemeld (dit is bij de TOR-systemen gebruikelijk).

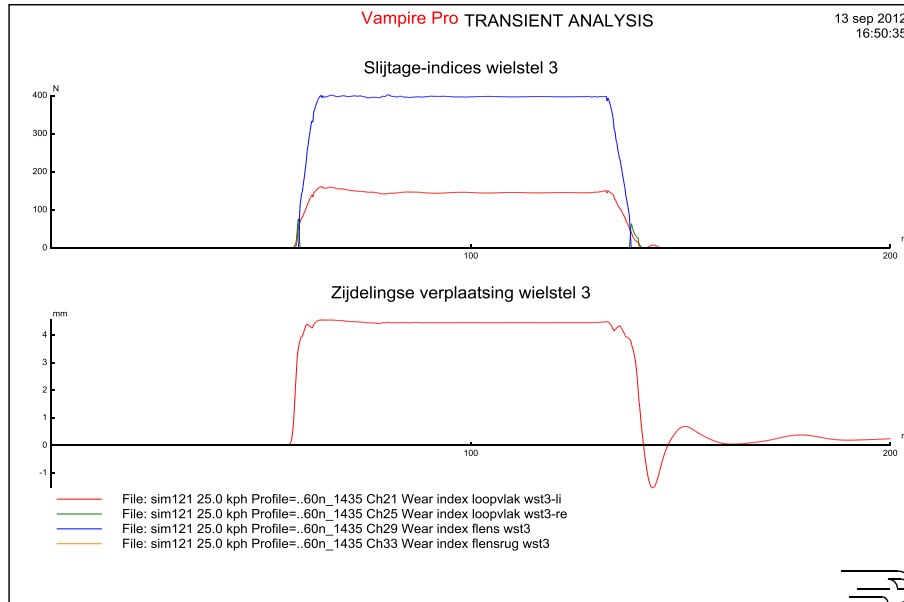
Prijsinformatie is opgevraagd bij de verschillende leveranciers (REBS en Dalimon). Dit leverde de volgende richtprijzen op: smeerinstallatie (reservoir, pomp, nozzle) voor zowel flens als TOR ca. € 3000,- (excl. Inbouw). TOR-control unit (incl. GPS): ca. 7000,- (excl. Inbouw). De aansturing van het TOR-systeem dient te worden ingeregeld (invoer GPS van de probleemlocaties) en later mogelijk bijgestuurd aan de hand van de opgedane ervaringen.

Referenties

- [1] Ian J McEwen, REVIEW of the USAGE of CHEMICALS in the MANAGEMENT of LOW ADHESION, The Adhesion Working Group, April 2003.
- [2] Torstensson, Nielsen, Simulation of rail roughness growth on small radius curves using a non-herzian and non-steady wheel-rail contact model, CM2012, Chengdu.
- [3] Hardwick, Lewis, Lewis, The effect of Friction Modifiers on Wheel/Rail isolation at low axle loads, CM2012, Chengdu.
- [4] Eadie, Santoro, Railway noise and the effect of top of rail liquid friction modifiers: changes in sound and vibration spectral distributions, CM2003, Gothenburg.
- [5] Chestney, Dadkah, Eadie, The effect of top of rail friction control on European passenger system: the Heathrow express experience, CM2009, Firenze
- [6] A. Kofmehl, Avoiding rail squeak on bends by TOR control, European rail technology review 2011.
- [7] Ishida, Friction moderating system for preventing low rail corrugations in sharp curves, CM2009, Firenze.
- [8] Horst, Hiensch, Experimental evaluations of friction modifiers for integral network wheel/rail interface friction management, CM2009, Firenze.
- [9] R. Jeanneret, Ein Zürcher entquietscht Berner Strassenbahn, Journal 21, dec. 2011.
- [10] Beljaars, Test frictieverbeteringsinstallaties, HRC kenmerk SK-HH-000030463, 2000.
- [11] Wiersma, RegioCitadis-tram op het stedelijk tramnet in Den Haag – vervolgonderzoek naar de normering van de scheluwte, DeltaRail/12/120019/002, d.d. 7 feb. 2012.
- [12] Zulassungsverfahren Schienenkopfkonditionierung bei Strassenbahnen, Eisenbahn Technische Rundschau (ETR) sept. 2012.

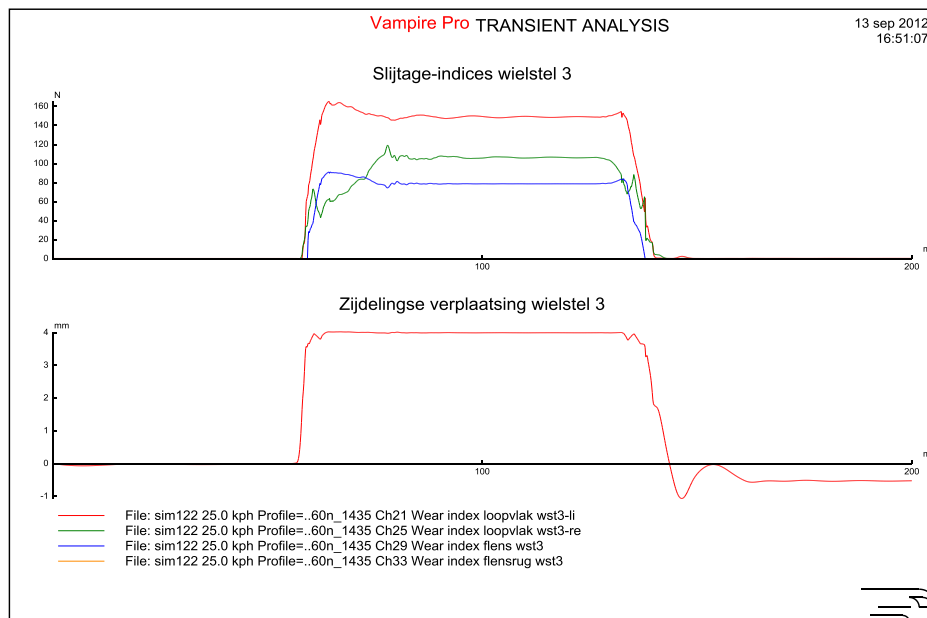
Bijlage 1 – flenssmearing vs. slijtageontwikkeling (spoorwijdte 1435mm)

Simulatie		Traject	Voertuigmodel				Wielprofiel		Railprofiel			Rijsnelheid km/u			Flenssmearing									
nummer	datum		C	T	L	C	LA	11G	T	11G	L	11G	LA	theoretisch	gesleten	theoretisch 1435	theoretisch 1445	meting	10	25	variabel	nee	ja	
121		boog 1, R=52m, li								x				x		x				x			x	
122										x				x		x				x				x



VAMPIRE Plot

Slijtage-index ongesmeerd. blauw: binnenzijde flens, groen: buitenzijde flens (latzijde), rood: loopvlak.



VAMPIRE Plot

Slijtage-index gesmeerd. blauw: binnenzijde flens, groen: buitenzijde flens (latzijde), rood: loopvlak. Reductie slijtage treedt op voor flenscontact.

Bijlage 2 – flenssmearing vs. slijtageontwikkeling (spoorwijdte 1445mm)

Simulatie		Traject	Voertuigmodel					Wielprofiel		Railprofiel			Rijsnelheid km/u			Flenssmearing								
nummer	datum		C	T	C	L	C	11G	T	11G	L	11G	LA	theoretisch	gesleten	theoretisch 1435	theoretisch 1445	meting	10	25	variabel	nee	ja	
125		boog 1, R=52m, li							x					x			x			x			x	
126									x					x			x			x			x	

