

# Band – Weg Interactie

A. de Boer, H.L. ter Huerne, J.W.M. Noordermeer, D.J. Schipper  
*Institute of Mechanics, Processes and Control (IMPACT)*  
*Universiteit Twente*

## Samenvatting

De huidige infrastructuur van wegen waarover men zich snel en comfortabel kan verplaatsen is niet meer weg te denken uit onze maatschappij. Twee “componenten” die hierbij een belangrijke rol spelen zijn het wegdek en de band. Het contact tussen band en wegdek is mede bepalend voor de veiligheid. De rolweerstand beïnvloedt het brandstofverbruik en dus de uitstoot van uitlaatgassen. De mechanische eigenschappen en geometrie van het wegdek en de band bepalen de geluidproductie (verkeersgeluid) maar ook de mate van slijtage van beide componenten (fijn stof). Er wordt onderzoek gedaan om de veiligheid, de rolweerstand, de duurzaamheid e.d. van banden en wegdek te verbeteren. In veel gevallen wordt dit door de bandenindustrie en de wegdekproducenten afzonderlijk gedaan. Op deze manier streeft men er naar om te komen tot een optimale band en een optimaal wegdek. Maar wat optimaal is voor de band hoeft nog niet optimaal voor het wegdek te zijn. Vandaar dat voor een echt optimale combinatie van band en wegdek, onderzoek moet worden gedaan naar de gekoppelde situatie of wel naar band-weg interactie. Om dit te realiseren hebben 4 onderzoeksgroepen van de Universiteit Twente met ervaring op het gebied van wegdekken of banden de krachten gebundeld teneinde band-wegdek interactie (modelmatig en experimenteel) integraal te kunnen onderzoeken.

## 1. Inleiding

De huidige infrastructuur van wegen waarover men zich snel en comfortabel kan verplaatsen is niet meer weg te denken uit onze maatschappij. Het gebruik van deze infrastructuur brengt ook de nodige nadelen met zich mee. Te denken valt aan *milieuaspecten* zoals uitstoot van uitlaatgassen en verkeersgeluid, *veiligheidsaspecten* door o.a. verkeersongevallen en *kosten* voor aanschaf van voertuigen en brandstof, de aanleg van het infrastructuurnetwerk en het “op peil” houden van dit volledige transportsysteem. Twee “componenten” die bij deze mobiliteitsproblematiek een belangrijke rol spelen zijn het wegdek en de band. Het contact tussen band en wegdek is mede bepalend voor de veiligheid, de rolweerstand beïnvloedt het brandstofverbruik en dus de uitstoot van uitlaatgassen, de mechanische eigenschappen en geometrie van het wegdek en de band bepalen de mate van geluid dat wordt geproduceerd (verkeersgeluid) maar ook de mate van slijtage van beide componenten (fijn stof). Voor de aanleg van wegen, de productie van banden en het voortbewegen zijn grondstoffen (olie, rubber) nodig die schaars worden. Gegeven deze zaken en de noodzaak om o.a. verkeersgeluid, slijtagedeeltes en brandstofverbruik te verminderen is het opmerkelijk dat onderzoek naar de ontwikkeling van banden en wegconstructies wereldwijd veelal geïsoleerd plaatsvindt. Bij onderzoek op het gebied van band-weg interactie concentreert men zich vaak op òf het wegdek waarbij de invloed van de band slechts als randvoorwaarde wordt meegenomen, òf de band waarbij het wegdek als randvoorwaarde in rekening wordt gebracht. Bij het onderzoek naar band-weg lawaai wordt enerzijds onderzoek gedaan door bandenproducenten die stille banden willen ontwikkelen (Sandberg) en anderzijds door wegenbouwers, wegbeheerders en onderzoeksinstituten die samen stille wegdekken verder willen optimaliseren (Sluer, 2006 & Sluer 2008). Eenzelfde verschijnsel ziet men op het gebied van duurzaamheid (slijtage), veiligheid (grip, gladheid) en brandstof verbruik (rolweerstand (Gabel et al.; Reuvekamp)). Er wordt gestreefd naar afzonderlijke optimalisaties van de band en het wegdek terwijl de combinatie verre van optimaal kan zijn. Bijvoorbeeld een zeer slijtvaste band kan veel schade aanrichten aan het wegdek.

Om optimale oplossingen te verkrijgen voor de combinatie band en wegdek is het essentieel het systeem integraal te analyseren of wel de band-wegdek interactie. In dit artikel zal eerst worden aangegeven wat hiervoor vereist is. Daarna wordt een overzicht gegeven van onderzoek dat op het gebied van banden en wegdekken op de Universiteit Twente (UT) wordt gedaan en ten slotte zal worden aangegeven hoe deze reeds aanwezige kennis de basis vormt voor verder onderzoek op het gebied van band-weg interactie dat op de Universiteit Twente wordt uitgevoerd.

## 2. Probleemanalyse

De interactie tussen band en wegdek wordt bepaald door wat er gebeurt in het gemeenschappelijke contactvlak. De krachten die door het voertuig worden geleverd en nodig zijn om vooruit te komen worden via het contactvlak overgebracht op het wegdek. Hierdoor ontstaan belastingen in het contactvlak die de band en het wegdek dynamisch vervormen. De grootte, richting en het frequentiegebied (spectrale inhoud) van de dynamische belastingen zijn afhankelijk van de materiaal eigenschappen en de geometrie van de band en het wegdek. De materiaaleigenschappen van het wegdek en van de band

hangen af van de samenstelling van de basis materialen en de manier waarop deze zijn geproduceerd. De dynamische belastingen in het contactvlak zijn belangrijk voor diverse verschijnselen die optreden in de band en het wegdek.

De dynamische (wisselende) belastingen worden nog steeds gezien als de belangrijkste veroorzakers van het “rafelen” van open asfalt wegdekken (Huurman). Ook andere veelvoorkomende schade mechanismen zoals vermoeiing en scheurvorming worden veroorzaakt door de dynamische belastingen. Slijtage van het wegdek en de band ontstaat door een combinatie van de dynamische belastingen, de oppervlakte ruwheid en materiaaleigenschappen van band en weg, en de adhesie tussen band- en wegdek materiaal. Deze aspecten zijn eveneens belangrijk voor de veiligheid zoals grip of slipweerstand op droog, nat en ijsig wegdek, respectievelijk bepalend voor de rolweerstand en daarmee voor het energieverbruik van de band. Door de trillingen die tengevolge van de dynamische belastingen in de band ontstaan wordt geluid afgestraald en, afhankelijk van de mate van absorptie, voor een deel gereflecteerd door het wegdek. In het contactvlak wordt ook geluid geproduceerd door de beweging van de lucht tussen het profiel van de band en het wegdek. Het hierdoor veroorzaakte geluidsniveau wordt mede bepaald door de porositeit van het wegdek en de vorm van het bandprofiel.

### **3. Band- en wegdekonderzoek op de UT**

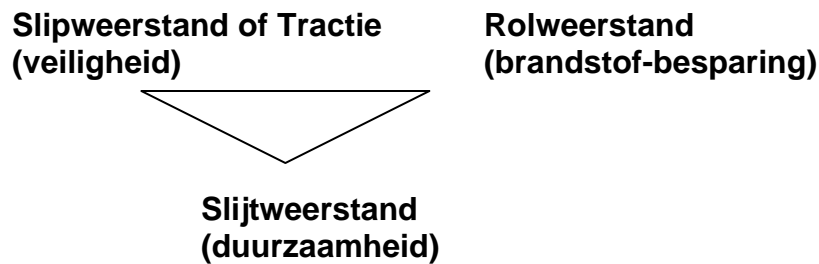
Op de Universiteit Twente wordt binnen de faculteit Construerende Technische Wetenschappen en het “Institute of Mechanics Processes and Control (IMPACT)” onderzoek gedaan op het gebied van banden en wegdekken door de onderzoeksgroepen “Elastomer Technology & Engineering (ETE)”, “Construction Management & Engineering (CME)”, “Surface Technology & Tribology (STT)” en “Structural Dynamics & Acoustics (SDA)”. In deze paragraaf wordt per onderzoeksgroep beschreven wat er aan onderzoek wordt gedaan op de desbetreffende gebieden.

#### ***Elastomer Technology & Engineering (ETE)***

De toepassing van elastomeren (rubbers) in banden beslaat  $\pm 70\%$  van het wereldverbruik aan rubber. Daardoor vormt de rubber-technologie als het ware één geheel met bandentechnologie.

Banden zijn de verbindende schakel tussen het voertuig en het wegdek, bedoeld om zonder falen de commando's over te dragen die door de bestuurder van het voertuig worden gedictieerd. Dit met aanpassing aan grote verschillen in type wegdek, temperatuur en weersomstandigheden. Het vermogen van banden om richtmoment over te dragen op het wegdek, oneffenheden en beschadigingen van het wegdek op te vangen, en in te spelen op de grote variaties in omstandigheden is onlosmakelijk met het rubber-gedrag van banden verbonden.

Naast een lange lijst eisen te stellen aan banden zijn drie eigenschappen van doorslaggevend belang in het contact met de weg namelijk: Slipweerstand of tractie, rolweerstand en slijtweerstand. Samen vormen zij de zgn. “Magische Driehoek” van de bandentechnologie (zie fig. 1): optimalisatie van één van de drie eigenschappen staat altijd in concurrentie met de andere twee.



Figuur 1. “Magische driehoek” van de bandentechnologie.

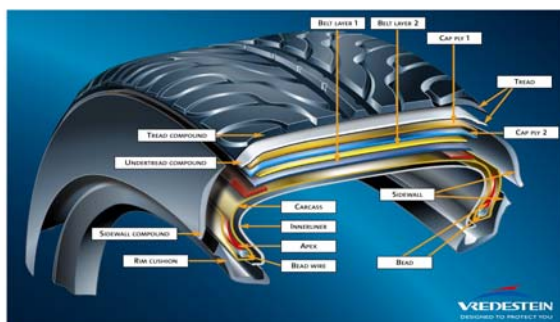
Een band is opgebouwd uit 10 – 15 verschillende onderdelen (zie fig. 2):

- Rubberen lagen voor het loopvlak, de zijwanden, de voering, de velg-rubber, enz.;
- Textiele koordlagen ter fixatie van de vorm van de band onder druk;
- Staal-koorden voor de maatvoering op de velg en stabilisatie van het loopvlak.

Aan alle componenten worden specifieke eisen gesteld in het geheel van het functioneren van de band. De veelheid van onderdelen met geheel verschillende materiaal-karakteristieken vereist een gedetailleerde beschrijving van al die onderdelen teneinde een goede modelvorming van de diverse elementen van het samengestelde gedrag van de totale band te kunnen uitvoeren.

Binnen de werkeenheid ETE ligt de nadruk van het onderzoek op de volgende aspecten van banden-fabricage en daarmee op het totaal-gedrag van de band:

- Invloeden van de diverse samenstellingcomponenten en mengprocedures op de eigenschappen van de diverse rubberen bandonderdelen;
- Karakterisering van het dynamisch mechanisch gedrag van deze onderdelen, als basis voor modelbeschrijvingen, o.a. van bandenlawaai;
- Onderzoek naar verbeterde hechtingsmethodieken: chemisch en mechanisch, tussen versterkende textiel- en staal-koorden en bandenrubber;
- De constructie/opbouw van de band en de invloed daarvan op de diverse functionaliteiten in contact met de weg.

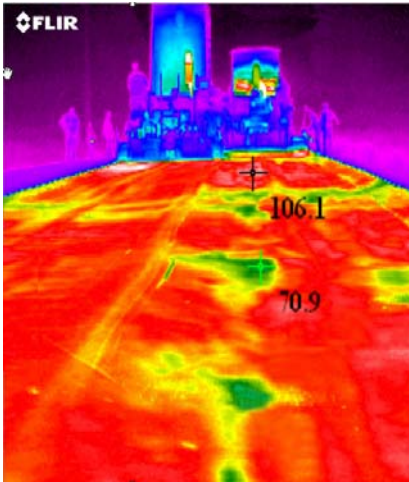


Figuur 2. Opbouw van een band: meer dan 40 compounds en 14 verschillende versterkingsmaterialen (Nylon, Rayon, Polyester, Staal) (Met dank aan Vredestein Banden B.V.).

### **Construction Management & Engineering (CME)**

Op het gebied van band-wegdek interactie concentreert het onderzoek van CME zich vooral op:

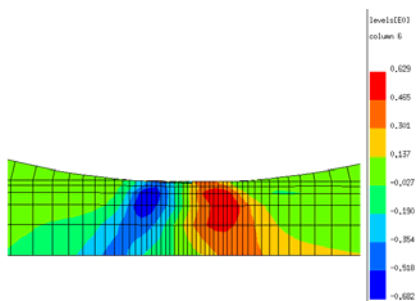
- Het verbeteren van de homogeniteit van wegdeksamenstelling en hiermee de eigenschappen.
- Verbetering van de levensduur van wegdekken door bestudering en simulatie van compactie.
- Het in kaart brengen van belangrijkste risico's bij productie en gebruik van wegen teneinde de levensduur beter te kunnen bepalen.



Veranderingen in de marktomstandigheden dwingen wegenbouwers tot een verdere professionalisering van hun bedrijfsproces: het verwerken en verdichten van asfalt. Teneinde de eigen aanpak en organisatie te verbeteren worden mogelijkheden gezocht in een betere beheersing van o.a. het primaire proces en de kwaliteit van het gerealiseerde product. CME verricht binnen dit kader, samen met aannemers, onderzoek naar wijze van verwerking van het asfaltmengsels voor het in kaart brengen van verschillen in levensduur van de weg. Onder andere wordt onderzoek gedaan naar methoden om de temperatuur tijdens de verwerking van het asfalt ter plekke efficiënt te homogeniseren alsmede naar methoden de temperatuur te monitoren tijdens de verwerking (zie fig.3).

*Figuur 3. Gemeten temperatuurverdeling van net verwerkt asfalt.*

Met betrekking tot het walsen van asfalt tijdens de aanleg van wegen bestaan weinig theoretische informatie en modellen over het materiaalgedrag. Om hierop meer grip te

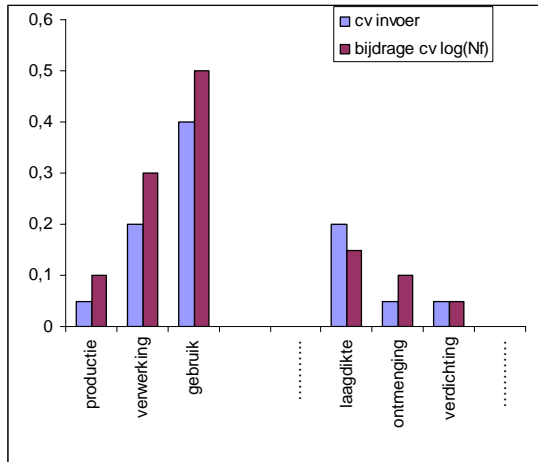


krijgen en effecten beter te kunnen begrijpen en voorspellen zijn bij CME simulatie methoden ontwikkeld die zijn gebaseerd op de Eindige Elementen Methode (EEM). Hiervoor is een EEM programma gebruikt dat speciaal is ontwikkeld voor het plastisch vervormen van materialen (extrusie, rubberpersen). Figuur 4 illustreert de schuifspanningen ( $\sigma_{xy}$ ) als gevolg van een gesimuleerd walsproces van asfalt.

*Figuur 4. Berekende schuifspanningverdeling in asfalt tijdens walsen.*

Werk is onderhevig aan onzekerheden waardoor risico's optreden. Onzekerheden zijn in beginsel gebrek aan kennis. Sommige kennis kan worden verworven, andere niet. Gevolgen kunnen in zekere mate worden beïnvloed. De wegenbouwers, de weggebruikers en de wegbeheerders die het onderhoud doen hebben met deze problematiek te maken. In het bijzonder omdat er niet of moeilijk beheersbare, maar wel belangrijke factoren optreden zoals het weer of de ondergrond en omdat veelal vele partijen in complexe relaties samenwerken. Om beslissingen te nemen die met onzekerheden verband houden, is het belangrijk kansen en gevolgen en hun effecten te kunnen bepalen.

De CME groep participeert in de ontwikkeling van een methodiek voor de analyse van technische risico's van asfaltverhardingen. Deze methodiek omvat zowel theoretische als praktische aspecten, waarin het asfaltproductie- en verwerkingsproces en het gebruik van de



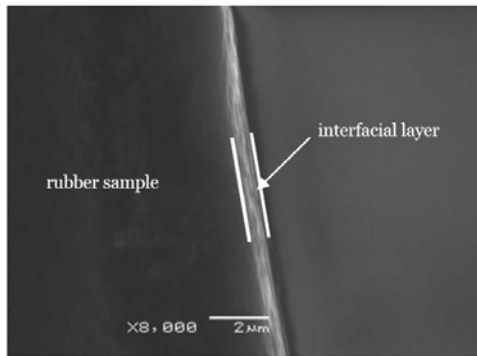
verharding aan de orde komen. Er wordt een toepasbaar instrument ontwikkeld waarmee kan worden bepaald welke risico's er zijn en hoe groot de belangrijkste risico's zijn. Het model verschaft inzicht in de robuustheid gedurende de levenscyclus van een wegverharding met betrekking tot de belangrijkste schademechanismen. Figuur 5 illustreert de belangrijkste bijdragen van verschillende aspecten aan de levensduur van de wegconstructie.

*Figuur 5. Bijdrage van verschillende aspecten aan de levensduur van een wegverharding.*

Bovenstaande onderzoeken leggen een link tussen de mechanisch belasting op het asfalt en het bijbehorende spanningsveld en gedrag en is daarom van belang voor band-wegdek contact. Inventarisatie van risico's is van belang omdat het aangeeft in welke mate "gebruik" relevant is voor slijtage aan de weg.

### **Surface Technology & Tribology (STT)**

De wrijving in het contactvlak tussen band en weg is het gevolg van adhesie tussen rubber en asfalt en lokaal ploegen van de stenen van het wegdek, ten gevolge van locale slip, door het visco-elastisch deformerend rubber. De rolweerstand is voornamelijk het gevolg van hysteresis verliezen (visco-elastisch deformerende band). Door middel van experimenten op bijvoorbeeld een op een pin-op-schijf wrijvingstester kan door gebruik te maken van een stenen kogel in contact met een rubberen schijf of een rubberen kogel tegen een stenen schijf het belang van beide termen (adhesie en ploegen) aantonen. Afhankelijk van de deformatie en deformatie snelheid varieert de wrijving. Het modelleren van de wrijving in het band-weg contact is één van de onderwerpen waaraan binnen de Surface Technology and Tribology groep wordt gewerkt. Met name gaat de aandacht uit naar de oppervlaktelaag, zie figuur 6, die zich vormt op het rubber als gevolg van deformatie en bepalend is voor de wrijving.



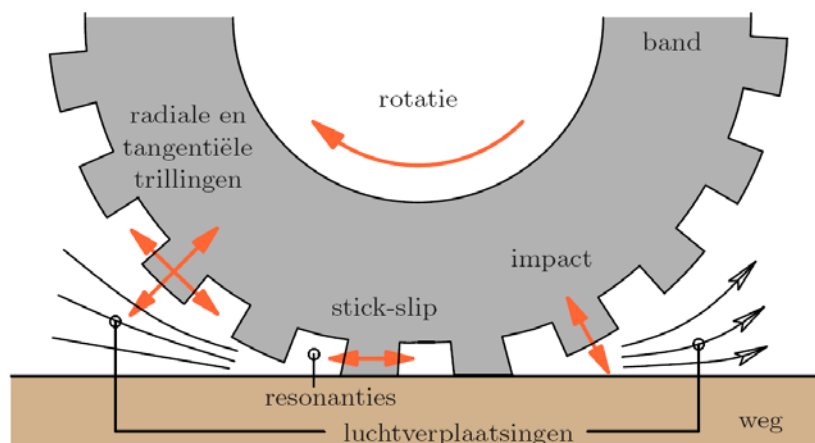
Figuur 6. Vorming van oppervlakte laag op rubber, Deladi 2006.

Per jaar wordt binnen Nederland alleen al met personen auto's circa 5.000 m<sup>3</sup> rubber versleten. Zeer open asfalt (ZOAB) heeft bij op- en afritten, bochten ten gevolge van verhoogde wrijving (versnellen en vertragen) veel last van slijtage (rafelen). Naast het modelleren van de wrijving vindt er dan ook onderzoek plaats naar de slijtage van de band en het wegdek. De modellen zijn gebaseerd op scheurvorming en scheurgroei. Door de wrijving zal de maximale spanning in het materiaal aan het oppervlak concentreren. Een gevormde scheur zal vanaf het oppervlak het materiaal ingroeien leidend tot uitbrokkelen van materiaal.

### *Structural Dynamics & Acoustics (SDA)*

Door het stiller worden van de (auto-)motoren is bandenlawaai de dominante geluidsbron. Gevolg is dat bandenfabrikanten onderzoek doen naar het reduceren van het geluid dat wordt afgestraald (gegenereerd) door banden. Men wil tijdens het ontwerp al kunnen voorspellen wat de invloed van de materiaal keuze (rubber) en de vorm van de band en het profiel is op het geluid dat de band produceert, om op die manier aan de steeds strengere geluidsnormen (milieu) zoals opgelegd door de overheid te kunnen voldoen. Dit houdt in dat de "Magische Driehoek" van de bandentechnologie (zie fig.1) er een extra dimensie bij krijgt die het ontwerpen van optimale banden nog complexer maakt.

De initiële bron van het bandenlawaai is het contactgebied tussen band en wegdek (zie fig. 7). Hier ontstaan de dynamische belastingen, die de band in trilling brengen en waardoor deze geluid gaat afstralen. Verder worden er in het contactvlak ook nog lucht-verplaatsingen gegenereerd (tussen profiel en wegdek) die eveneens een bijdrage leveren aan het bandenlawaai ("air-pumping").



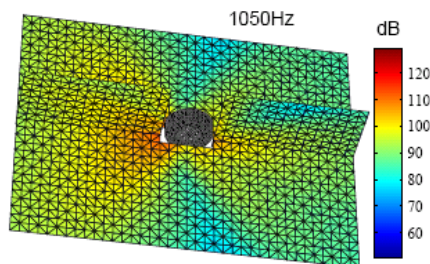


*Figuur 7. Mechanismen die een rol spelen bij genereren van bandenlawaai.*

Voor een goede voorspelling van het bandenlawaai zijn modellen nodig waarmee:

- Het dynamisch gedrag van de band wordt beschreven.
- Het afgestraald geluid t.g.v. de bandtrillingen kan worden berekend.
- Het geluid t.g.v. de luchtverplaatsing in het contactvlak kan worden berekend.
- De dynamische belastingen in het contactvlak kunnen worden berekend.

Om het afgestraalde geluid tot 2000 Hz te kunnen berekenen (zie fig. 8) worden de modellen heel rekenintensief, waardoor ze moeilijk in een ontwerpomgeving kunnen worden gebruikt (Brinkmeier et.al.). Met name de manier van modelleren van de dynamische belastingen in het contactvlak is een belangrijke factor die bepaalt hoeveel rekentijd nodig is en hoe nauwkeurig het uiteindelijk afgestraalde geluid kan worden berekend. Binnen SDA wordt onderzoek gedaan naar het toepassen van een contactberekeningsmethode uit de elastohydrodynamische smering voor het bandenlawaai probleem (Wijnant). Deze methode zal worden gekoppeld met de andere 3 hierboven genoemde benodigde modellen zodat het door de band gegenereerde geluid zo snel kan worden berekend dat het in een ontwerpomgeving kan worden gebruikt.



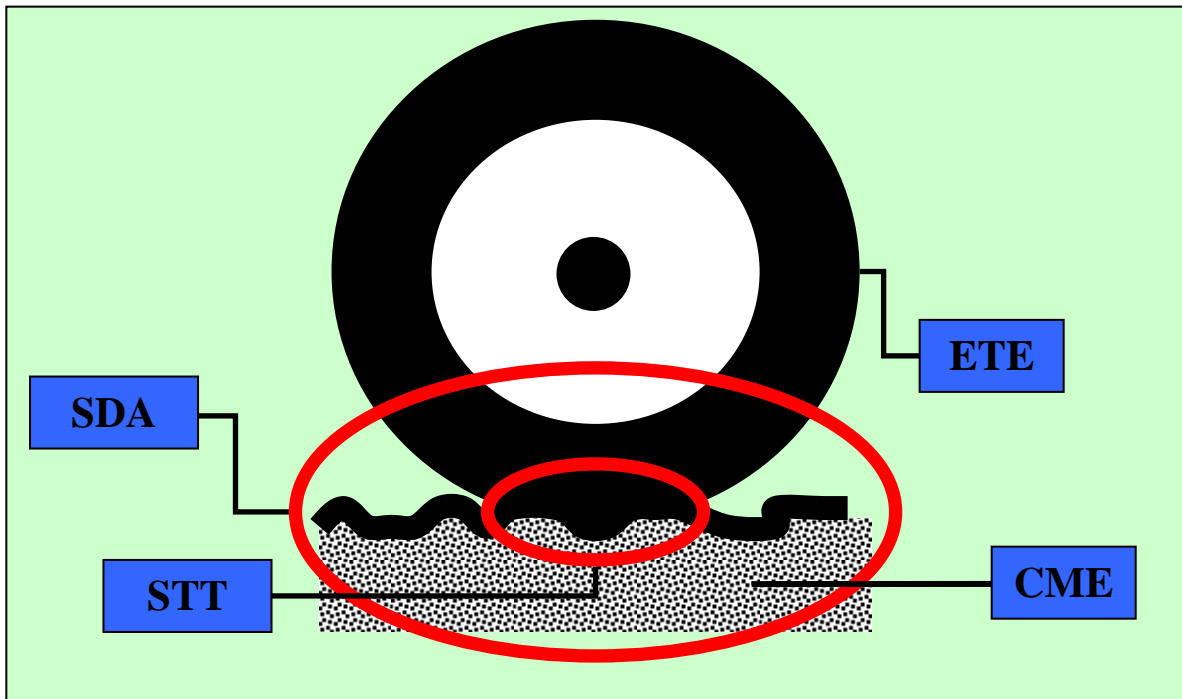
*Figuur 8. Berekend geluidsniveau in decibel (dB) bij 1050 Hz van een band zonder profiel op een harde ondergrond.*

#### **4. Band - weg interactie onderzoek op de UT**

Bij band-weg interactie moeten de band, het wegdek en het contactvlak tussen beiden worden beschouwd als één totaal systeem waar gekoppelde analyses noodzakelijk zijn. Zoals in de vorige paragraaf is aangegeven (zie ook fig. 9) doet ETE onderzoek naar de eigenschappen en de verwerking van het materiaal van de band (rubber) en CME naar die van het asfalt. Het onderzoek naar het slijtage gedrag van de banden en het asfalt dat wordt uitgevoerd door STT concentreert zich vooral in het contactgebied. Om de dynamische belastingen te kunnen berekenen die een bron zijn van het bandenlawaai concentreert SDA



zich ook op het contactgebied maar om het afgestraalde geluid te kunnen berekenen is ook informatie nodig over de geometrie van de omgeving van het contactvlak en de band zelf.



*Figuur 9. Deelgebieden van band-weg-contact system waar onderzoek van UT groepen zich concentreert.*

Voor het ‘eigen’ onderzoek leveren de 4 onderzoeksgroepen elkaar de nodige gegevens aan die nodig zijn als input. Bijvoorbeeld moet SDA voor het modelleren van het dynamisch gedrag van de band de materiaaleigenschappen weten, die kunnen worden aangeleverd door ETE. Maar zoals vaak bij dit soort multidisciplinair onderzoek gebeurt, is dit een eenrichtingsverkeer terwijl tweerichtingsverkeer nieuwe mogelijkheden biedt zoals (in genoemd voorbeeld) aanpassing van de rubbersamenstelling om minder geluidafstraling te krijgen. De 4 onderzoeksgroepen op de Universiteit Twente werken op het gebied van band-weg interactie als een multidisciplinair team samen om op deze manier aspecten m.b.t. band en wegdek integraal te modelleren.

Gestart is met het ontwikkelen van een methode om de dynamische belastingen te kunnen uitrekenen in het contactvlak. Hierbij wordt de invloed van de eigenschappen van het band- en wegdek materiaal en de geometrie meegenomen alsmede de tribologische (wrijving en smering) eigenschappen in het contactvlak. De methode zal worden gevalideerd met (deel)testen die worden gedaan in de laboratoria van de UT en mogelijke andere geïnteresseerden. Met deze methode zal vervolgens worden onderzocht wat de invloed is van de dynamische belastingen op de eigenschappen van de band en het wegdek. Onderzoek kan worden gedaan naar scheurvorming in het wegdek, slijtage van band en wegdek, invloed van rubber samenstelling op het gedrag van de band en het wegdek enz.

## **5. Conclusie**

Er wordt veel onderzoek gedaan naar banden en wegdekken. Dit is grotendeels discipline georiënteerd waardoor in het onderzoek het zwaartepunt ligt bij òf de band met in het

gunstigste geval het wegdek als randvoorwaarde of het wegdek met de band als randvoorwaarde. Op de Universiteit Twente was het niet anders; de onderzoeksgroepen “Structural Dynamics & Acoustics” en “Elastomer Technology & Engineering” concentreerden zich vooral op het afgestraald geluid van de band respectievelijk het materiaalgedrag van de band. “Construction Management & Engineering” concentreerde zich op het uitvoeringsproces en het gedrag van asfalt tijdens de uitvoering. De onderzoeksgroep “Surface Technology & Tribology” richt zich vooral op het scheidingsvlak (=contactgebied) en daardoor op de band en het wegdek. Om het integrale probleem te kunnen onderzoeken hebben de vier onderzoeksgroepen besloten een consortium te vormen. Doel van het consortium is het systeem band-wegdek integraal te onderzoeken en bedrijven, wegbeheerders en onderzoeksgroepen die eveneens geïnteresseerd zijn in band-weg interactie, uit te nodigen te participeren. In Nederland is veel kennis en ervaring op specifieke (geïsoleerde) gebieden al aanwezig. Zo is onlangs een geavanceerd levensduur analyse model (LOT, Huurman 2008) beschikbaar gekomen teneinde meer grip te krijgen op de levensduur van open asfalt soorten (Reisen, 2008). Door deze te combineren in een multidisciplinaire omgeving zoals in dit artikel is beschreven kan de volgende stap voorwaarts worden gemaakt in zowel de kwaliteit en duurzaamheid van wegen als die van banden om zodoende ons transportsysteem verder te optimaliseren. Verder kan een bijdrage geleverd worden aan het reduceren van de nadelige effecten die gepaard gaan met het gebruik van dit systeem.

## **6. Literatuur**

Brinkmeier M., Nackenhorst U. and Ziefle M. Finite element analysis of rolling tires – A state of the art review. In Proceedings of International CTI Conference Automotive Tire Technology, Stuttgart, Germany, 2007.

Deladi, E.L., PhD Thesis, University of Twente, 2006.

Huurman, M., Lifetime Optimisation Tool, LOT, Main report, Innovatie Programma Geluid, Report 7-07-170-1, Delft, 2008.

Gäbel, G., Moldenhauer, P. and Kröger, M. Tire/road interaction: from local mechanisms to global effects. In Tire Technology Conference and Expo, Cologne, Germany, 2008.

Reisen, F. van, Erkens, S., Ven, M. v.d., Voskuilen J. en Hofman R., Verbetering levensduur tweelaags ZOAB, Innovatie Programma Geluid, Dienst Verkeer en Scheepvaart Rijkswaterstaat, rapport DVS-208-20, Delft 2008.

Reuvekamp, L.-Ph.A.E.M. PhD-thesis University of Twente, the Netherlands, 2003.

Sandberg U. and Ejsmont J.A. Tyre/Road Noise Reference Book. INFORMEX, Harg, SE-59040 Kisa, Sweden, 2002.

Sluer BW. en Oosterveld M., ZOAB in process, Zó naar verbetering van levensduur, Prijsvraag Schoner, Stiller en Homogener Asfalt, Eindrapport uitvoeringsfase, Innovatie Programma Geluid, Dienst Verkeer en Scheepvaart, Rijkswaterstaat, rapport DVS-208-20, Delft 2008.

Sluer BW., Domselaar MJ., Beemt R. van den en Huerne HL. ter, ZOAB in process, Zó naar verbetering van levensduur, Prijsvraag Schoner, Stiller en Homogener Asphalt, Eindrapport IPG, Dienst Weg- en Waterbouw, Rijkswaterstaat, rapport DWW-2006-078, Delft 2006.

Wijnant Y.H. and Boer A. de. A new approach to model tyre/road contact. In Proceedings of ISMA2006, Leuven, Belgium, 2006.