

# Wegdekinvloed op de rolweerstand en CO<sub>2</sub> emissie van vrachtwagens

ir. Erik de Graaff (M+P)  
dr. ir. Paul Fortuin (Rijkswaterstaat)  
ing. Erik van Gils (M+P)

## Samenvatting

Nederland heeft ambitieuze doelstellingen voor de CO<sub>2</sub> reductie. Ook wegbeheerders denken na hoe zij hun steentje kunnen bijdragen. Het toepassen van wegdekken met lage rolweerstand is één van de maatregelen om de CO<sub>2</sub> emissie van wegverkeer te reduceren. Het verschil in rolweerstand tussen wegdekken kan top-top oplopen tot ruim 30%. Afhankelijk van de rijomstandigheden kan de CO<sub>2</sub> emissie van het wegverkeer op deze wegdekken tot ruim 8% verschillen. Voor rijkswegen kan de CO<sub>2</sub> emissie van het wegverkeer met 2 tot 4% gereduceerd worden als het standaard enkellaags ZOAB+ wegdek zou worden vervangen door tweelaags ZOAB-fijn.

Al deze inzichten over rolweerstand zijn echter gebaseerd op onderzoek met personenauto's. Voor vrachtwagens was het effect van wegdekken tot voor kort nog onbekend. Theoretische inzichten voorspellen zowel een kleiner als een groter effect. Geschikte meetmethoden bestaan nog niet of staan nog in de kinderschoenen. Internationale deskundigen betwijfelen of een betrouwbaar meetinstrument überhaupt te realiseren is.

In opdracht van Rijkswaterstaat heeft M+P onderzoek gedaan naar het effect van wegdekken op de CO<sub>2</sub> emissie van vrachtwagens. Eerst is een inventarisatie gemaakt van potentieel geschikte meetmethoden en instrumenten. Daarna is een meetsysteem opgebouwd, zijn er metingen uitgevoerd en is het effect bepaald van een potentiële transitie van ZOAB+ naar tweelaags-ZOAB-fijn.

Er is gekozen voor een meetsetup met brandstofverbruiksmetingen aan een volledige vrachtwagen in situ en niet voor een meting aan bijvoorbeeld een trailer of in een laboratorium. Dit was een grote technische uitdaging, maar leverde tenslotte verrassend nauwkeurige resultaten op. Daarnaast maakt deze meetsetup het mogelijk om onderzoek te doen naar andere invloedsfactoren van de infrastructuur op het brandstofverbruik en de CO<sub>2</sub> emissie van verkeer. (zie bijv. paper [14] in dezelfde sessie van de CROW infradagen).

Het gemeten verschil in brandstofverbruik voor de onderzochte vrachtwagen op stille wegdekken ten opzichte een gemiddeld ZOAB+ bedraagt:

- $0,9 \pm 0,2$  % voor gemiddeld tweelaags ZOAB 4/8
- $1,7 \pm 0,2$  % voor gemiddeld tweelaags ZOAB fijn 2/6

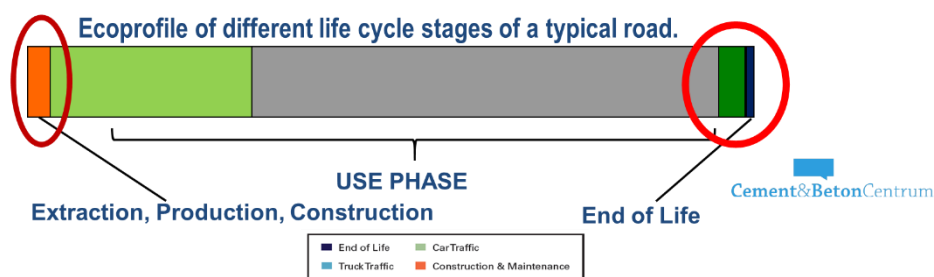
Voor een doorvertaling naar het totale vrachtwagenpark, met gemiddeld zwaardere vrachtwagens, moeten deze getallen met een factor 1,5 worden vermenigvuldigd. Dit betekent 2 a 3% brandstof- en CO<sub>2</sub> besparing voor vrachtverkeer bij een transitie van ZOAB+ naar tweelaags ZOAB fijn 2/6 op het hoofdwegennet. Deze uitkomst komt overeen met de theoretische verwachting en is in dezelfde range als het gevonden verschil voor personenauto's.

**Steekwoorden:** klimaatakkoord, CO<sub>2</sub> reductie, vrachtverkeer, maatregelen, wegbeheerder, rolweerstand, wegdekken

## 1. Inleiding

Om te voldoen aan het VN klimaatakkoord 2015 van Parijs heeft Nederland zich tot doel gesteld om de CO<sub>2</sub> emissie, ten opzichte van 1990, in 2030 met 49% te reduceren en in 2050 met 95%. In het ontwerp Nederlandse klimaatakkoord 2018 staat voor de tafel mobiliteit een reductiedoel van 7,3 Mton CO<sub>2</sub>.

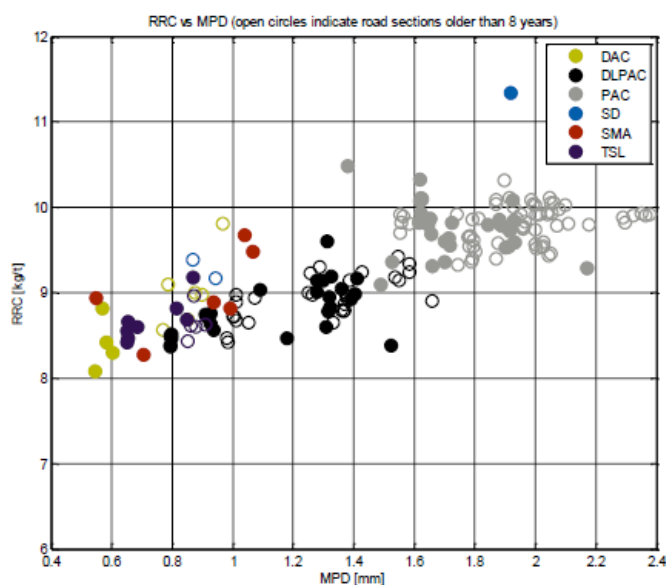
Veel aandacht gaat daarbij naar het elektrificeren van de aandrijving van voertuigen. Dan kunnen CO<sub>2</sub> neutrale energiebronnen (wind en zon) worden gebruikt. Opslag van energie kan in batterijen, maar ook in de vorm van waterstof. Daarnaast is er aandacht voor het reduceren van de energiebehoefte van verkeer. Energie die niet verbruikt wordt geeft een direct besparing van CO<sub>2</sub> emissie. Daarnaast draagt het ook bij aan de acceptatie van elektrisch vervoer. Een groot probleem van elektrische voertuigen (vooral vrachtwagens) is de reikwijdte. De reikwijdte wordt vergroot door de energiebehoefte te reduceren.



→ 5% besparing op gebruiksfase = totaal van constructiefase

figuur 1 CO<sub>2</sub> voetafdruk van een weg, Als aandeel verdeeld over de verschillende levensfasen (Bron: [15])

Beleidsmakers, wegbeheerders, voertuig- en bandenindustrie zoeken naar maatregelen om bij te dragen aan dit reductiedoel. Voor wegbeheerders is het van belang te weten dat circa 95% van de CO<sub>2</sub> footprint van een weg wordt bepaald tijdens de gebruiksfase en slechts 5% tijdens de aanleg en recyclingsfase.



figuur 2 Rolweerstand van een personenautoband versus wegdekttextuur (MPD) (Bron: [1])

Het toepassen van wegdekken met lage rolweerstand is één van de maatregelen om de CO<sub>2</sub> emissie van wegverkeer te reduceren. Het verschil in rolweerstand tussen wegdekken kan top-top oplopen tot ruim 30%. Afhankelijk van de rijomstandigheden kan de CO<sub>2</sub> emissie van het wegverkeer op deze wegdekken tot ruim 8% verschillen. Voor rijkswegen kan de CO<sub>2</sub> emissie van het wegverkeer met 2 tot 4% gereduceerd worden als het standaard enkellaags ZOAB+ wegdek zou worden vervangen door tweelaags ZOAB-fijn.

Deze inzichten over verschillen in rolweerstand zijn echter gebaseerd op onderzoek met personenauto's. Voor vrachtwagens was het effect van wegdekken tot voor kort nog onbekend. Theoretische inzichten voorspellen zowel een kleiner als groter effect. Geschikte meetmethoden bestaan nog niet of staan nog in de kinderschoenen. Internationale deskundigen betwijfelen of een betrouwbaar meetinstrument überhaupt te realiseren is. Maar rolweerstand van vrachtwagens is een belangrijke "energieverbruiker" en CO<sub>2</sub> emitter van wegverkeer. Voor snelwegcondities is ongeveer de helft van het motorvermogen en daarmee de CO<sub>2</sub> emissie van vrachtwagens nodig om de rolweerstand te overwinnen.

Het effect van wegdekken op de rolweerstand van vrachtwagens is daarmee niet alleen relevant voor de CO<sub>2</sub> reductie van wegverkeer maar ook voor het reductiepotentieel van rolweerstandarme wegdekken. Daarom heeft Rijkswaterstaat M+P opdracht gegeven om onderzoek te doen naar het effect van wegdekken op de CO<sub>2</sub> emissie van vrachtwagens.

## 2. Potentiele meetmethodes voor vrachtwagens

Veel van de inzichten over verschillen in rolweerstand van wegdekken zijn gebaseerd op metingen met een speciale trailer van de TU Gdansk. De meetband is een gestandaardiseerde personenautoband. Dit is op dit moment de 'state of the art' trailer, die overal in Europa wordt ingezet. Ieder jaar worden er in Nederland één of twee meetcampagnes georganiseerd. Inmiddels is er een goedgevulde database met gegevens beschikbaar.



*figuur 3 De driewielige rolweerstandstrailer van de TU Gdansk meet de rolweerstand van een personenautoband. De twee voorwielen zijn steunwielen. Het achterwiel is het meetwiel en zit onder een windkap. (foto: M+P tijdens één van de meetcampagnes in Nederland)*

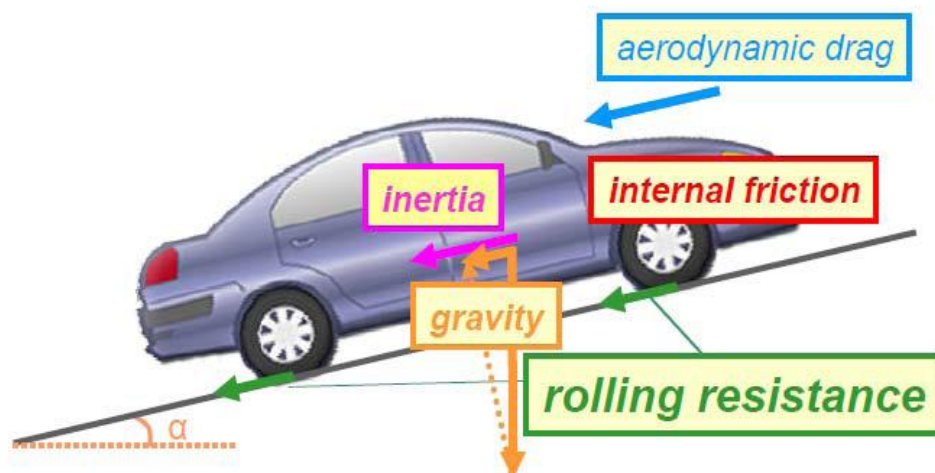
Voor vrachtwagens bestaan er echter nog geen soortgelijke standaard inzetbare meettrailers. Er zijn wel meetsystemen in ontwikkeling die mogelijk met enige aanpassing inzetbaar zouden kunnen worden gemaakt. In de aanloop van het onderzoek naar de rolweerstand van vrachtwagens zijn de volgende alternatieven overwogen:

1. De vrachtwagen-trailer combinatie van IPW in Duitsland. Deze meet de sleepkracht van een geconditioneerde twee-assige vrachtwagen trailer. Deze trailer is de enige tot dan toe beschikbare bron van betrouwbare rolweerstandsmetingen met vrachtwagenbanden op verschillende wegdekken. De trailer is in de beschikbare opzet echter alleen inzetbaar bij 15 km/h op een afgesloten proefbaan. Dat past niet bij de beoogde inzet in Nederland op de openbare (snel)weg onder normaal verkeer bij 80 km/h;
2. Een 5<sup>e</sup> wiel vrachtwagen-trailer. Er zijn diverse instituten in Europa (o.a. IPW, FKFS, RWTH) die beschikken over een vrachtwagen trailer, met in het midden van de trailer een 5<sup>e</sup> wiel waarvan de krachten worden gemeten. Deze 5<sup>e</sup> wiel trailers zijn inzetbaar bij 80 km/h op de openbare weg. Deze trailers zijn echter primair ontwikkeld om de relatief grote stuurkrachten van banden te meten. De vereiste nauwkeurigheid om de kleine variaties in rolweerstandkracht ten gevolge van wegdekvariaties te meten is daarbij onzeker en nog niet bewezen. Ontwikkelingen gaan voort, maar waren ten tijde van ons onderzoek nog niet beschikbaar;
3. Een aanpassing van de TUG trailer, zodanig dat er met vrachtwagenbanden gemeten kan worden. Het voordeel is dat de TUG trailer flexibel op de openbare weg inzetbaar is en nauwkeurige resultaten oplevert. Het nadeel is dat de trailer ongeschikt is voor de bandlasten en maatvoering van vrachtwagenbanden. Als compromis is overwogen om met bestelwagenbanden te meten;
4. Directe brandstofverbruiksmetingen aan een complete vrachtwagen op verschillende wegdekken. Het voordeel van deze aanpak is dat het een full-scale experiment is. De weerstand en verliezen van banden wordt onder realistische omstandigheden in kaart gebracht, inclusief bijvoorbeeld de spoorkrachten en de slip vanwege aandrijfkraften. Dit is een groot voordeel ten opzichte van trailers, omdat alle bovengenoemde trailers slechts de rolweerstand meten van een vrij rollend wiel en een geïdealiseerd verband veronderstellen tussen rolweerstand en brandstofverbruik. Het nadeel van deze aanpak is dat de signaal/ruis verhouding een grote uitdaging is. Het verwachte verschil in brandstofverbruik is relatief klein (enkele procenten), terwijl er veel invloedsfactoren zijn die het brandstofverbruik in de praktijk tot wel 100% of meer kunnen verstoren.

Alle vóór- en nadelen afwegend heeft Rijkswaterstaat besloten om door te gaan met alternatief vier: een experiment van directe brandstofverbruiksmetingen aan een volledige vrachtwagen.

### **3. Brandstofverbruiksmetingen**

De doelstelling van het dit experiment is om het potentiële verschil van 2 tot 3% in brandstofverbruik voor een vrachtwagen rijdend op een wegdek met tweelaags ZOAB (fijn) en diezelfde vrachtwagen op een wegdek met ZOAB+ eenduidig aan te tonen. De uitdaging is groot, omdat het verschil relatief klein is, en de momentane fluctuaties in brandstofverbruik vele malen groter kunnen zijn.



figuur 4 Verschillende weerstandskrachten die tijdens het rijden van invloed zijn op een voertuig en overwonnen moeten worden door de aandrijfkraft van de motor. (Bron Michelin [3])

Het brandstofverbruik is afhankelijk van de weerstandskrachten die het voertuig ondervindt en die moeten worden overwonnen door de aandrijfkraft van de motor. In figuur 4 is een illustratie gegeven van de krachten die inwerken op het voertuig. Als deze krachten fluctueren dan moet de aandrijfkraft en daarmee het brandstofverbruik worden aangepast om de snelheid constant te houden. De belangrijkste versturende factoren zijn:

1. De invloed van hellingen en hoogteverschillen; het verwachte verschil in rolweerstand is vergelijkbaar met een helling van 0,5 tot 1 meter per kilometer. Zelfs in het vlakke Nederland treden dit soort hellingen veelvuldig op, vanwege bruggen, viaducten en andere hellingen;
2. De invloed van acceleratie; onder acceleratie kan het brandstofverbruik (tijdelijk) gemakkelijk verdubbelen. Zelfs als een voertuig op de cruise control rijdt, fluctueert de snelheid en het brandstofverbruik rondom een gemiddelde waarde;
3. De invloed van wind; zowel wind in rijrichting als zijwind kunnen grote invloed hebben op het brandstofverbruik. Vooral zijwind is hierbij verraderlijk, omdat deze niet gecompenseerd kan worden door bijvoorbeeld heen en weer te rijden;
4. De invloed van wind-versturende elementen, zoals andere vrachtwagens waarachter “gestayerd” wordt of geluidschermen die lokaal de zijwind verminderen;
5. De invloed van rijnsnelheid. De invloed van rijnsnelheid op het brandstofverbruik is ordegrrootte 1% per km/h;
6. De toestand en stabiliteit van het voertuig tijdens de metingen, waaronder de stabiliteit van de temperatuur van de drijflijn; het al dan niet gebruiken van de nevenaggregaten en (stroom)verbruikers, de stabiliteit van de massa wordt bijvoorbeeld beïnvloed door brandstofverbruik tijdens de metingen. Het massaverschil tussen een volle of lege brandstoftank geeft 0,5 tot 5% verschil in rolweerstand afhankelijk van het voertuig en de grootte van de tank.

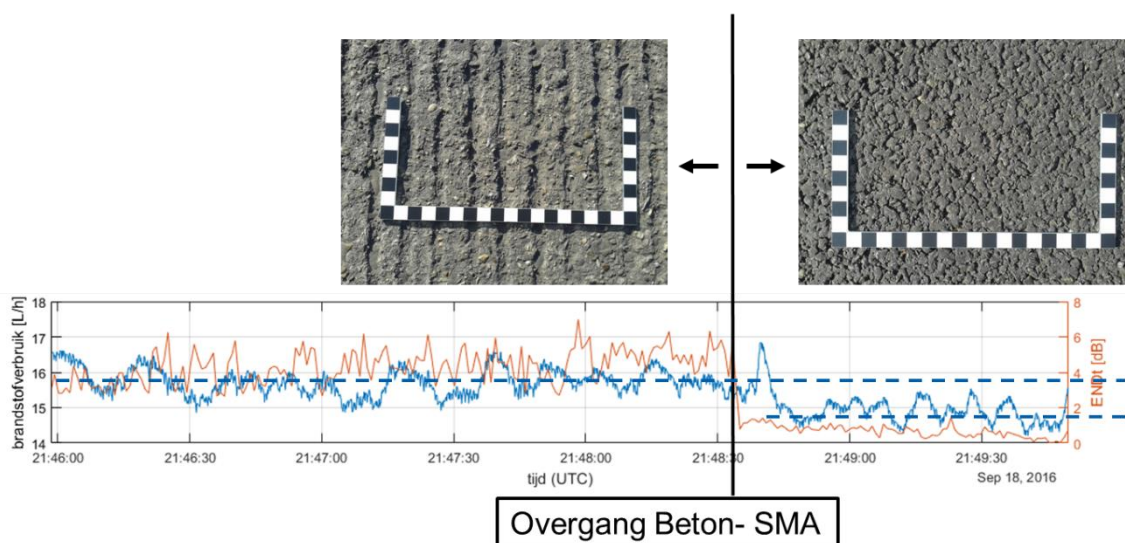
Bovenstaande onzekerheidsanalyse laat zien dat het een uitdaging is om de onderzoeksvragen met voldoende zekerheid te kunnen beantwoorden. Na afweging van een aantal mogelijkheden is gekozen voor een aanpak die metingen van verschillende eigenschappen combineert met een wetenschappelijk-empirisch model.



figuur 5 De twee meetvoertuigen in actie op de snelweg. Op de voorgrond de bestelwagen met o.a. de windmeter en textuurmeter. Op de achtergrond de vrachtwagen waarvan het brandstofverbruik wordt gemeten.

De globale aanpak is als volgt. Een (twee-assige) vrachtwagen wordt uitgerust met een meetsysteem die de boordcomputer uitleest. Hiermee is een groot aantal signalen beschikbaar, waaronder snelheid, diverse temperaturen, brandstofverbruik, stuurhoek en afstand tot de voorligger. Deze signalen worden gekoppeld aan diverse externe signalen zoals GPS coördinaten, de momentane wind en de temperatuur van de band, en worden opgeslagen op een datalogger. Met dit voertuig worden diverse lange trajecten van ZOAB+ en tweelaags ZOAB bereden (telkens circa 50 km “enkele reis”).

Tegelijkertijd wordt de wegdekttextuur van de bereden wegvakken gemeten. Hiermee ontstaat een datafile waarbij brandstofverbruik en wegdekttextuur op secondebasis aan elkaar gelinkt is. In dezelfde database worden op secondebasis alle overige parameters opgeslagen en/of naderhand via GPS coördinaten gelinkt.



Overgang Beton- SMA

figuur 6 Voorbeeld van een brandstofverbruikssignaal en een textuursignaal rondom de overgang van een Beton-wegdek naar een SMA-wegdek.

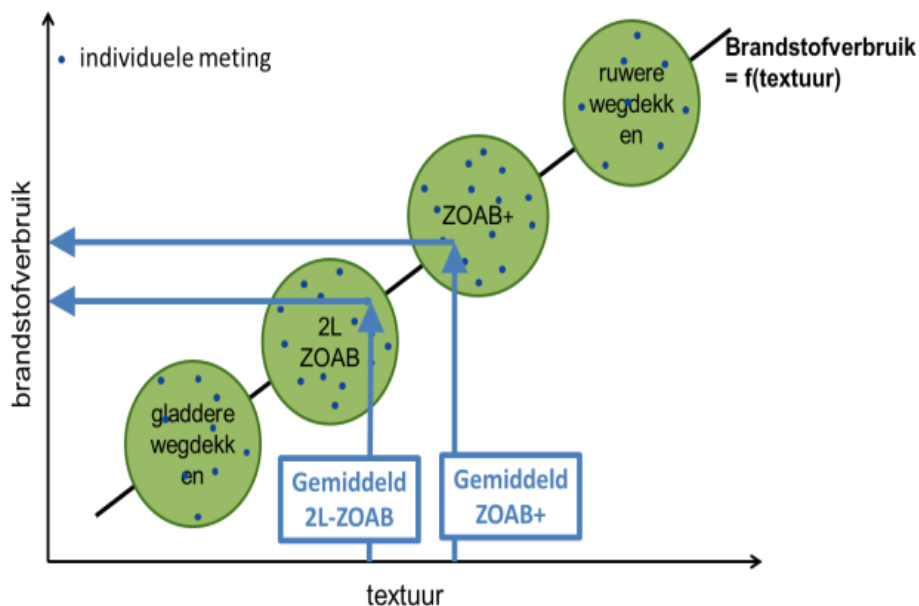
De invloed van versturende factoren wordt op twee manieren geminimaliseerd:

- Ten eerste worden de metingen uitgevoerd op locaties en tijdstippen waar de verstoring zo klein mogelijk is. Zo wordt er bijvoorbeeld vooral gemeten in de avonduren, als de wind is gaan liggen en het verkeersaanbod lager is.
- Ten tweede wordt aan de hand van een aantal specifieke metingen een compensatiemodel opgesteld, waarmee de restinvloed van versturende factoren op het brandstofverbruik wordt ingemeten en gecompenseerd. Zo is een compensatie model bepaald voor onder andere snelheidsvariatie, voor helling, voor temperatuur en voor wind.

Het ruwe brandstofsignaal wordt met het compensatiemodel gecorrigeerd voor de effecten van helling, wind en snelheidsvariatie. Daarmee wordt de variatie in brandstofverbruik met 86% gereduceerd en resteert een brandstofverbruikssignaal waar de invloed van het wegdek veel duidelijker uit is te halen.

#### 4. Meetresultaten: invloed wegdek op rolweerstand van het meetvoertuig

Met het meetvoertuig zijn metingen uitgevoerd over een afstand van in totaal ruim 1000 km. Op al deze wegvakken is het (gecompenseerde) brandstofverbruik gemeten en daarnaast ook diverse wegdektexuur parameters, zoals MPD, RMS, Skewness en IRI. Daarna is op grond van een multi-regressieanalyse het statistische verband bepaald tussen brandstofverbruik en textuurparameters.



figuur 7 Principe schets van de gevolgde aanpak, waarbij op grond van een verband tussen textuur en brandstofverbruik het verschil wordt bepaald tussen een gemiddeld ZOAB+ en een gemiddeld tweelaags ZOAB.

Naast een groot aantal wegvakken met ZOAB+ en tweelaags ZOAB zijn ook wegvakken met SMA, DAB en Beton gemeten. De bredere selectie aan typen wegvakken is toegevoegd om een bredere variatie aan textuur in de dataset te krijgen en daardoor een betrouwbaarder verband te kunnen bepalen tussen textuurparameters en brandstofverbruik. In figuur 7 is een schets gegeven van het principe van deze aanpak. Het verschil in brandstofverbruik op

ZOAB+ en tweelaags ZOAB wordt vervolgens niet alleen bepaald op grond van het hier toevallig bereiden arsenaal aan wegvakken, maar op grond van het gemiddelde van een veel grotere dataset met textuur gegevens.

Er is onderzoek gedaan naar het textuurmodel dat de beste voorspelling geeft van het brandstofverbruik. De beste correlatie wordt gevonden tussen brandstofverbruik en MPD. Door het toevoegen en combineren van diverse textuurmaten wordt het model nog iets beter. Voor het vervolg van het onderzoek is echter uitgegaan van een brandstofverbruikmodel op grond van alleen MPD, omdat van de MPD verreweg de meeste informatie is. De RMS, skewness en IRI van wegvakken zijn in veel mindere mate bekend. De IRI zou bovendien voor de Nederlandse wegdekken ook eerder afhangen van ondergrond, aanleg en staat van onderhoud, dan van het type wegdek van de toplaag. De berekende verschillen tussen ZOAB+ en tweelaags ZOAB (fijn) staan weergegeven in tabel I

Tabel I: Vermindering van het brandstofverbruik voor het meetvoertuig, rijdend op tweelaags ZOAB (fijn) t.o.v. ZOAB+ op basis van het brandstofverbruikmodel aangevuld met MPD gegevens van een grotere dataset. De opgegeven marges zijn de 95% betrouwbaarheidsintervallen.

wegdek	MPD-waarde bereik [mm]	gemiddelde MPD-waarde [mm]	vermindering brandstofverbruik t.o.v. ZOAB+ [%]
ZOAB	1,4 – 2,2	1,8	0,0
tweelaags ZOAB 4/8	1,1 – 1,5	1,3	0,9 ± 0,2
tweelaags ZOAB 2/6	0,6 – 1,2	0,9	1,7 ± 0,2

### 5. Opschaling: Invloed wegdek op CO2 emissie voor vrachtwagens

De metingen zijn uitgevoerd aan een twee-assige solo vrachtwagen zonder aanhanger met een effectieve beladen massa van 13,5 ton. Dit voertuig is gekozen om praktische redenen bij de uitvoering van de metingen. Op de Nederlandse snelwegen is de gemiddelde vrachtwagen echter veel zwaarder. Trekker opleggers vormen ongeveer 80% van het aanbod zwaar verkeer op de snelweg. Er is een verband tussen de massa van de vrachtwagen en de gevoeligheid voor (veranderingen) in rolweerstand. Ook de luchtweerstand speelt hierbij een rol.

Voor de gemiddelde vrachtwagen is berekend dat deze een factor 1,5 gevoeliger is voor veranderingen in rolweerstand dan de bovengenoemde meetvrachtwagen. Daardoor is ook de gevoeligheid van het brandstofverbruik voor textuurveranderingen een factor 1,5 groter. De hier gemeten verschillen tussen ZOAB+ en tweelaags ZOAB zijn dus eerder een onderschatting voor de totale vrachtwagenvloot van Nederland. Een schatting van de brandstofbesparing voor het gehele zware vervoer komt neer op 1,4% voor tweelaags ZOAB 4/8 en 2,6% voor tweelaags ZOAB 2/6. Dit is precies in lijn met de bevindingen voor personenauto's [1].

Het vrachtwagenverkeer in Nederland is verantwoordelijk voor 5,4 Mton CO2 emissie per jaar [12]. Naar schatting 70% hiervan is afkomstig van verkeer op het hoofdwegennet [13]. Eind 2015 lag er op 70% van het hoofdwegennet ZOAB [14]. 12% is overlaagd met DAB, 17% met tweelaags ZOAB en 1% met DGD's. Als we ervan uitgaan dat een transitie van



ZOAB+ naar tweelaags ZOAB (fijn) 2,6% brandstof en CO<sub>2</sub> emissie bespaart, dan komt dit neer op een jaarlijkse besparing van 69 kton CO<sub>2</sub>. Dit staat nog los van de CO<sub>2</sub> besparing door personenauto's.

## 6. Conclusies en bespreking

Het gemeten verschil in brandstofverbruik voor de onderzochte vrachtwagen in verhouding op stille wegdekken ten opzichte een gemiddeld ZOAB+ bedraagt:

- $0,9 \pm 0,2$  % voor gemiddeld tweelaags ZOAB 4/8
- $1,7 \pm 0,2$  % voor gemiddeld tweelaags ZOAB fijn 2/6

Dit gemeten effect is een conservatieve (veilig lage) schatting voor hetzelfde effect voor de gemiddelde vrachtwagen in Nederland. Onze schatting voor de brandstofbesparing voor het totale vrachtwagenpark is 2 a 3% bij een transitie van ZOAB+ naar tweelaags ZOAB fijn 2/6; Een doorvertaling van de te behalen CO<sub>2</sub> reductie van alle vrachtwagens op het hoofdwegennet, vanwege een vervanging van alle ZOAB+ op het gehele HWN door tweelaags ZOAB fijn komt neer op een besparing van 0,1 Mton CO<sub>2</sub> per jaar. Dit effect is conform de theoretische verwachting aan het begin van het project en is in dezelfde range als het gevonden verschil voor personenauto's.

De meettechnische innovatie bij dit project was het meten van brandstofverbruik van een compleet voertuig in normaal verkeer en het destilleren van een klein meetsignaal te midden van veel grotere stoorcomponenten. Ondanks grote technische uitdagingen en aanvankelijke scepsis bij velen, heeft dit project toch een valide uitkomst opgeleverd. Succesfactoren waren de goede keuzes en opzet van het experiment, het ontwikkelen van een stoor-compensatie model en wat geluk bij de goede weersituatie tijdens de metingen.

Wetenschappelijk geeft een meetresultaat van een volledig voertuig ook zeer waardevolle inzichten, naast de gebruikelijke metingen met een rolweerstandtrailer. Een volledig voertuig neemt, naast traditionele rolweerstand, ook andere invloeden van het band-wegdek contact mee, zoals de mate van doorslippen van een aangedreven as. Daarnaast maakt deze meetsetup het mogelijk om onderzoek te doen naar andere invloedsfactoren van de infrastructuur op het brandstofverbruik en de CO<sub>2</sub> emissie van verkeer. Een interessante bijvangst van dit project is bijvoorbeeld het effect van zijwind en zijwindgeleiders op het brandstofverbruik van vrachtverkeer (paper [14] in deze zelfde sessie van de CROW infradagen). Het succes van dit project heeft inmiddels geresulteerd in diverse vervolprojecten in binnen en buitenland.

## 6. Literatuur

- [1] J. Hooghwerff et al., "Influence of road surface type on rolling resistance – Results of the measurements 2013", M+P.DVS.12.08.3, 20-11-2013;
- [2] Michelin, "The Tyre, Rolling resistance and fuel savings", Publication by the Société de Technologie Michelin, 2003
- [3] ATZ, "Optimiertes Transportkonzept für Sattelzüge", ATZ, February 2008
- [4] ISO, "Characterization of pavement texture by use of surface profiles — Part 2: Terminology and basic requirements related to pavement texture profile analysis", ISO 13473-2:2008 (en)
- [5] ISO, "Characterization of pavement texture by use of surface profiles — Part 4: Spectral analysis of surface profiles", ISO 13473-4:2008 (en)

- [6] ISO, “Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 1: General principles and definitions”, ISO 5725-1:1994
- [7] ISO, “Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference”, ASTM E950M-09;
- [8] ISO, “Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements”, ASTM E1926-08.
- [9] E. Kuiper, N.E. Ligterink; “Voertuigcategorieën en gewichten van voertuigcombinaties op de Nederlandse snelweg op basis van assen-combinaties en as-lasten”; TNO rapport 2013 R12138; 5 december 2013
- [10] <http://www.part20.eu/nl/achtergrond/aerodynamica/>
- [11] <http://www.clo.nl/indicatoren/nl0130-emissies-naar-lucht-door-wegverkeer>
- [12] R. van den Brink e.a.; “Onderzoek naar de wegtype-verdeling en samenstelling van het wegverkeer”; Goudappel Coffeng rapport RPB004/Bkr/\$\$\$; 19 maart 2010
- [13] RWS, “Meerjarenplanning verhardingsonderhoud 2016-2020”, GPO-M16-NL, januari 2016
- [14] E. de Graaff e.a., “Invloed bermbosschages op zijwind en CO2 emissie vrachtwagens”, CROW infradagen 2020
- [15] L. Wathne, “Sustainable opportunities with concrete pavements” Betonwegendag 2011.