

Van Mourik Broekmanweg 6
2628 XE Delft
Postbus 49
2600 AA Delft

www.tno.nl

T +31 88 866 30 00
F +31 88 866 30 10

TNO-rapport

TNO 2016 R10426

Rolweerstand van wegdekken en mogelijkheden om deze reduceren door keuzes in het asfaltmengselontwerp

Datum	31 maart 2016
Auteur(s)	P.Pipilikaki G.A. Leegwater
Exemplaarnummer	0100295549
Oplage	
Aantal pagina's	29 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	
Opdrachtgever	Provincie Zuid-Holland
Projectnaam	
Projectnummer	060.01728

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2016 TNO

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
2	Beschrijving rolweerstand.....	4
2.1	Energiegebruik aanleg versus gebruiksfase	4
2.2	Bepalende factoren brandstofverbruik voertuigen.....	4
2.3	Definitie rolweerstand	5
2.4	Relatieve invloed van rolweerstand op brandstofverbruik.....	6
3	Invloedfactoren rolweerstand	9
3.1	Inleiding	9
3.2	Wegdek gerelateerde factoren	9
3.3	Wegdek factoren specifieke invloed	12
3.4	Samengevatte invloed van wegdekkarakteristieken op brandstofverbruik	20
4	Modellen	21
4.1	Inleiding	21
4.2	Modellen voor rolweerstandscoefficienten	21
4.3	Samenvatting modellen rolweerstand	23
5	Optimalisatie mogelijkheden van asfaltmengselontwerp	24
5.1	Recente studies naar de invloed van het asfaltmengsel op rolweerstand	24
5.2	Aanbevolen richting voor mengseloptimalisatie met verwachte besparing	24
6	Conclusies.....	26
7	Referenties	27
8	Ondertekening	29

1 Inleiding

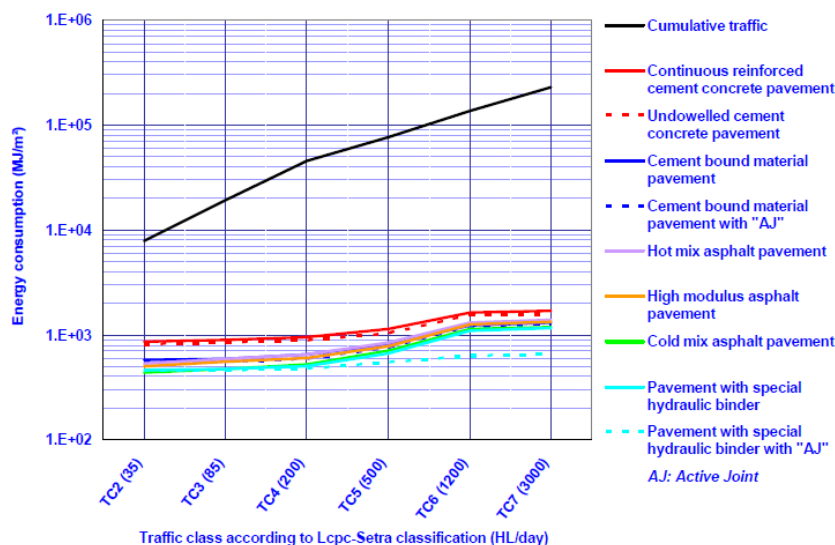
Er zijn diverse internationale onderzoeken die laten zien dat wegdekken karakteristieken invloed hebben op de rolweerstand en daarmee het brandstofverbruik van passerende voertuigen. Deze kennis kan worden ingezet om in het ontwerpstadium van een weg, bewuste keuzes te maken waardoor het brandstofverbruik van het passerend voertuigen gedurende de levensduur kan worden gereduceerd.

Dit rapport geeft een overzicht van de bestaande inzichten van de invloed van het wegdek op brandstofverbruik (grotendeels samengevat vanuit [31]). Vanuit de bestaande inzichten is vervolgens een vertaling gemaakt naar een ontwerprichting voor asfaltmengsels.

2 Beschrijving rolweerstand

2.1 Energiegebruik aanleg versus gebruiksfase

Er is in toenemende mate aandacht voor de milieubelasting die wordt veroorzaakt van de aanleg en onderhoud van wegen. Hierdoor is ook aandacht ontstaan voor de hoeveelheid energie die wordt verbruikt gedurende de levensduur van wegen door het passerende verkeer. In Figuur 2-1 is het energieverbruik voor het aanleggen en onderhouden van een weg en het energieverbruik ten gevolge van het verkeer over een periode van 30 jaar naast elkaar gezet. Uit deze figuur kan worden opgemaakt dat het verkeer (de zwarte lijn) over een periode van 30 jaar, 10 tot 345 keer meer energie consumeert dan het aanleggen en onderhouden van het wegdek (overige lijnen). De grafiek laat zien dat het relatieve aandeel van de energieconsumptie van het verkeer afhankelijk is van de omvang van de verkeersbelasting. Hieruit kan worden geconcludeerd dat ontwerpkeuzes die het energieverbruik van het verkeer beïnvloeden zich gemakkelijk terug laten verdienen gedurende de levensduur, zeker indien er sprake is van een grote verkeersbelasting.



Figuur 2-1 Energieverbruik voor verschillende wegdekconstructies (constructie en onderhoud), vergeleken met het energieverbruik van de totale cumulatieve verkeer, (HL = Heavy Lorries, dus vrachtverkeer), studie is gebaseerd op Franse situatie [1].

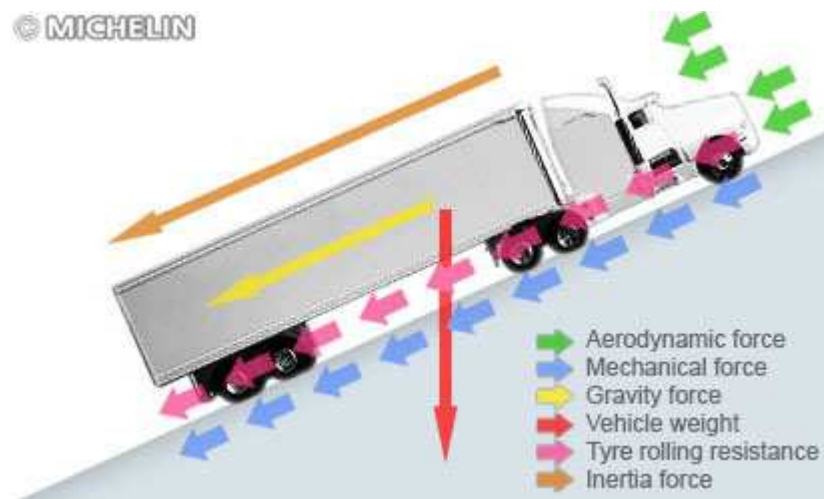
2.2 Bepalende factoren brandstofverbruik voertuigen

Het energieverbruik van een voertuig is afhankelijk van een aantal factoren [1], namelijk:

- Luchtweerstand; ($F_w = 1/2 \rho C_a v^2$, ρ =luchtdichtheid, C_a =aerodynamica voertuig, v =snelheid voertuig).
- Massatraagheid; ($F = m \cdot a$, m =massa, a =versnelling).
- Hoogteverschillen in de weg; ($E = m \cdot g \cdot h$, m =massa, g =gravitatiekracht, h =hoogteverschil).

- Rolweerstand; afhankelijk van band/wegdek contact
- Mechanische wrijving in het voertuig en aandrijfverliezen.

In Figuur 2-2 zijn deze factoren visueel gepresenteerd.



Figuur 2-2 Factoren die effect hebben op het energie/brandstofverbruik(rijweerstand) voor een voertuig [2].

Van de hierboven beschreven factoren wordt enkel de rolweerstand en in mindere mate de helling beïnvloed door het ontwerp van een weg, de andere parameters worden bepaald door het voertuig. Deze studie kijkt naar de invloed die wegontwerp heeft op het brandstofverbruik van voertuigen, daarom zullen factoren die worden bepaald door het voertuig niet verder worden beschouwd. De helling van een weg is een geografisch gegeven welke nauwelijks te beïnvloeden is door wegontwerp, dit aspect wordt daarom in dit rapport niet verder bestudeerd. Ook de helling in dwarsrichting heeft een kleine invloed en is hoe lager hoe beter, voor afwatering worden hier echter reeds specifieke eisen aan gesteld. Dit betekent dat het rapport zich verder richt op de invloed van rolweerstand op het brandstofverbruik.

Indien de rolweerstand indirect wordt gemeten via de totale rijweerstand moet men rekening houden met vele invloedfactoren van buitenaf op de rijweerstand. Een voorbeeld hiervan is het feit dat de luchtweerstand die ontstaat door de snelheid van het voertuig mede beïnvloed wordt door de luchtvochtigheid. De luchtvochtigheid geeft aan hoeveel waterdamp er zich in de lucht bevindt. Indien er meer waterdamp in de lucht zit (een hoge vochtigheid) ontstaat er meer weerstand en wordt de luchtweerstand groter.

2.3 Definitie rolweerstand

Rolweerstand is de weerstand die optreedt wanneer een rond voorwerp over een oppervlak rolt. De rolweerstand wordt bepaald door het energieverlies in de band, het wegdek en interactie tijdens het rollen van een band. De belangrijkste oorzaak van energieverlies is de vervorming van de band. De volgende factoren zijn bepalend voor de omvang van de rolweerstand [3]:

1. Macrodeformaties in de band (doorbuigings)vervorming als gevolg van uitzetten (zijwaarts) van de band).
2. Macrodeformaties van het wegdek.

3. Microdeformaties in het contactvlak van de band en het wegdek.
4. Wrijving in het contactvlak van de band met het wegdek.
5. Aerodynamische effecten van wegoppervlak en bandstructuur.

Een van de aspecten die het energieverlies bepaalt, is de vervorming van de band. Autobanden zijn gemaakt van o.a. rubber. Rubber is een visco-elastisch materiaal, dit betekent dat elke keer dat de banden vervormen er energie verloren gaat. Via het begrip arbeid kan de energie worden vertaald in een rolweerstandkracht, zoals weergegeven in onderstaande formule.

$$W_r = F_r \cdot \Delta x \quad (1)$$

W_r = arbeid tgv rolweerstand

F_r = Rolweerstand (N)

In geval van voertuigen is rolweerstand de weerstand die een band ondervindt bij het rollen over een wegoppervlak. De rolweerstand is dus een kracht in tegengestelde richting van de rijrichting. De rolweerstand wordt uitgedrukt in het product van de rolweerstandcoëfficiënt C_{rr} van de banden en de normaalkracht N (het gewicht van het voertuig). De formule voor de rolweerstand wordt volgens ISO 28580 [4] als volgt weergegeven:

$$F_r = C_{rr} \times m_v \quad (2)$$

F_r = Rolweerstand (N)

C_{rr} = Rolweerstandcoëfficiënt

m_v = Voertuig gewicht (kN)

De rolweerstandcoëfficiënt is een eigenschap van de interactie tussen een band en een wegdek. In de praktijk wordt er vaak vanuit het perspectief van of de band of het wegdek gekeken. De rolweerstand van een band wordt vaak gemeten op een standaard wegdek. In dit geval wordt de rolweerstandcoëfficiënt gezien als de eigenschap van een band. Echter het is ook mogelijk dat met een standaard band de rolweerstandcoëfficiënt van verschillende wegdekken wordt bepaald, nu is de rolweerstandcoëfficiënt dus de eigenschap van een wegdek. In de praktijk is het zelfs zo dat iedere bandwegdek combinatie een unieke rolweerstand oplevert. Het is daarom ook niet zeker dat, indien een wegdek een hele lage rolweerstand heeft bij één type band, deze lage rolweerstand ook optreedt voor alle typen banden. In deze studie wordt vanwege de eenvoud ervan uitgegaan dat indien er een lage rolweerstand gemeten is op een wegdek, dat dit geldt voor alle typen banden, dus dat de ranking hetzelfde blijft. Deze aanname wordt op dit moment gedaan in de bandensector, echter deze aanname is niet geverifieerd met onderzoek.

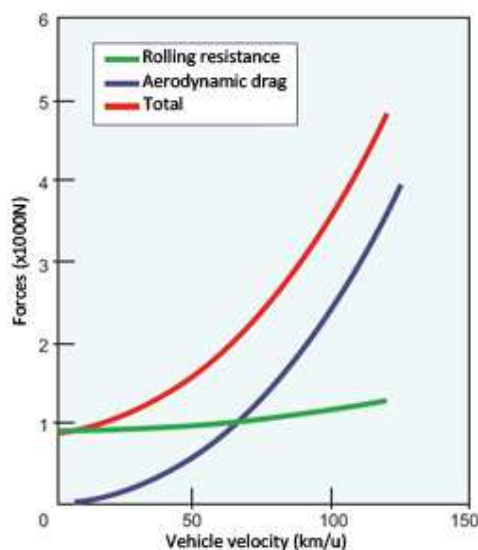
2.4 Relatieve invloed van rolweerstand op brandstofverbruik

In paragraaf 2.1 is al weergegeven dat rolweerstand een bepaald deel van het brandstofverbruik bepaalt. Om mogelijke besparingen beter in kaart te kunnen brengen is het van belang te weten welk deel van het brandstofverbruik kan worden toegerekend aan de rolweerstand.

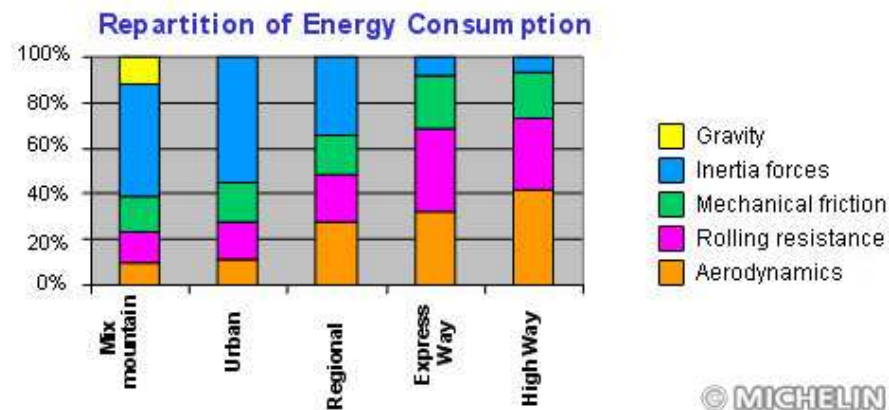
Er zijn verschillende studies gedaan naar de relatieve invloed van rolweerstand op het brandstofverbruik. In het literatuuronderzoek van Haaster [5] worden van verschillende onderzoeken het geschatte aandeel van de rolweerstand op het brandstofverbruik samengevat, deze waarden lopen uiteen van 18 tot 32%. Deze studie laat ook zien dat het relatieve aandeel van rolweerstand op brandstofverbruik afhankelijk is van het gewicht van het passerende verkeer. Dit betekent dat alhoewel vrachtwagenbanden doorgaans een lagere rolweerstandcoëfficiënt hebben, de rolweerstandskracht vanwege de grote massa voor vrachtwagens relatief hoger is dan voor personenwagens. Deze invloed van de massa van voertuigen werd ook al duidelijk uit de formules in paragraaf 2.1 en 2.3. Ervaring bij TNO Automotive leert dat voor een vrachtwagen die 80 km/u rijdt en maximaal beladen is de rolweerstand zelfs ongeveer 50% van de rijweerstand zal bedragen, bij personenauto's is deze relatieve invloed lager in de orde grootte van 10%.

Het type weg en daarmee de gemiddelde snelheid (bijv. 50, 80, 120 km/h) en het verkeersgedrag is ook van invloed op het relatieve aandeel dat de rolweerstand uitmaakt van de rijweerstand. In paragraaf 2.1 is al aangegeven dat de luchtweerstand kwadratisch toeneemt toe met de snelheid, terwijl de rolweerstand nauwelijks toeneemt met de snelheid, zie

Figuur 2-3. Dit betekent dus dat naarmate een voertuig sneller gaat er relatief meer brandstof wordt verbruikt om de luchtweerstand te overwinnen ten opzichte van brandstofverbruik dat nodig is voor de rolweerstand. Daarnaast varieert de impact van rolweerstand in het totale energieverbruik van een voertuig per type weg sterk als gevolg van de verkeersintensiteit [6] (veel verkeer en opstoppen) of specifieke wegeigenschappen (bijv. aanwezigheid van verkeersdrempels). In dit geval moet veel worden opgetrokken en geremd, waardoor relatief veel energie verloren door dissipatie van remenergie en versnellingskrachten. Dit is ook te zien in Figuur 2-4 van Michelin. In de figuur is te zien dat de rolweerstand voor alle type wegdekken een significant aandeel vertegenwoordigt van het brandstofverbruik (15 tot 35%), waarbij de rolweerstand bij een snelweg een relatief groter aandeel inneemt dan bij een stadsweg.



Figuur 2-3 Voertuigsnelheid in relatie met de weerstand[7].



Figuur 2-4 Aandeel van o.a. wrijving, rol- en aerodynamische weerstand voor verschillende wegtypes op het energieverbruik [2].

In de literatuur wordt de ene keer verwezen naar rolweerstand en de andere keer naar brandstofverbruik. Teneinde de verschillende waarden uit de literatuur te kunnen vergelijken wordt in deze studie uitgegaan van een vaste verhouding tussen de rolweerstand en het brandstofverbruik. In [5] werden waarden tussen de 18 en 32% gevonden voor het aandeel van de rolweerstand in het brandstofverbruik. In [8] wordt onderstaande formule gegeven om het effect van de rolweerstand op het brandstofverbruik te berekenen:

$$\Delta F_c / F_c = \eta \Delta C_{rr} / C_{rr} \quad (3)$$

$$\eta = \sim 0.2$$

$$C_{rr} = \text{Rolweerstandscoefficiënt}$$

$$F_c = \text{Brandstofverbruik}$$

Met deze formule wordt gesuggereerd dat de rolweerstand 20% van het brandstofverbruik bepaalt. Deze 20% valt binnen de range die is gevonden door Haaster [5]. Deze verhouding van 20% zal in de verdere studie worden aangehouden om twee redenen, namelijk de relatieve eenvoud en omdat deze aan de onderkant van het spectrum zit, waardoor de kans op overschatting van de impact van de rolweerstand wordt beperkt.

Voor implementatie van wegdekken met een lage rolweerstand moet men zich echter bewust blijven dat de belasting op de weg en het type weg van belang zijn voor besparingen die kunnen worden gerealiseerd. Investeren in een weg om een lagere rolweerstand te verkrijgen levert immers per bestede euro meer op als dit een weg is met veel vrachtverkeer waar 80km/uur mag worden gereden in vergelijking met een stadsweg met relatief veel personenwagens.

3 Invloedfactoren rolweerstand

3.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk is reeds toegelicht dat er 5 factoren van invloed zijn op de rolweerstand, namelijk macrodeformaties in de band, macrodeformaties van het wegdek, microdeformaties in het contactvlak van de band en het wegdek, wrijving in het contactvlak van de band met het wegdek en de aerodynamica van het wegdek en de band. In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe deze factoren relateren tot de wegdekkarakteristieken.

3.2 Wegdek gerelateerde factoren

3.2.1 *Wegdek morfologie*

Voor de wrijving en microdeformaties in de band en het wegdek is het wegdekoppervlak van grote invloed. De beschrijving van het wegdekoppervlak of wegdek morfologie betreft verschillende schaalniveaus. Er worden in wegdek morfologie de volgende schalen onderscheiden; microtextuur, macrottextuur, megatextuur en onvlakheid. Figuur 3-1 geeft al deze schaalniveaus weer, met daarbij vermeldt welke invloed de schaalniveaus hebben op voertuigen en omgeving [9, 10]. Uit de figuur kan worden opgemaakt dat de rolweerstand wordt beïnvloed door de wegmorfologie in het gebied van 10 mm tot 25 m, deze range betreft de macro- en megatextuur en de onvlakheid van het wegdekoppervlak.

In deze figuur is ook te zien dat het verlagen van de rolweerstand niet automatisch tot gevolg heeft dat de stroefheid vermindert, de invloedgebieden overlappen elkaar een beetje, maar stroefheid wordt voor het grootste gedeelte bepaald door processen die op een lagere schaal spelen dan de schaal die relevant is voor de rolweerstand. De meetmethoden voor het bepalen van de wegdek morfologie zullen hierna worden besproken.

De macrotextuur betreft de textuur met golflengtes met een bereik van 0,5 tot 50 mm. De megatextuur betreft de textuur met golflengtes met een bereik van 50 tot 500 mm. De textuur kan op verschillende manieren worden gemeten. Vroeger maakte men gebruik van de zandvlekmethode waarmee de Mean Texture Depth (MTD) waarde werd bepaald [11]. In de praktijk varieert deze waarde tussen 0,5 en 2 mm. Tegenwoordig wordt meestal gemeten met lasers, uit de lasermeting kan vervolgens zowel de Mean Profile Depth (MPD) als de Root Mean Square (RMS) waarde worden bepaald volgens ISO 13473 [10]. In de Nederlandse praktijk varieert de MPD waarde tussen 0,3 en 2,5 mm en de RMS waarde tussen 0,4 en 2 mm. De lasermetingen worden uitgevoerd in het golflengtegebied van 1 tot 200 mm, met deze metingen wordt dus maar een beperkt gedeelte van de macro- en de megatextuur (gezaamenlijk 0,5 mm tot 500 mm).

Onder onvlakheid verstaan we de oneffenheden in het wegdek waarbij de golflengtes van de ruwheid van het wegooppervlak groter zijn dan 0,5 meter. Er wordt onderscheid gemaakt tussen de vlakheid in dwarsrichting en in lengterichting. Hoewel onvalkheid in de dwarsrichting door verkanting of spoorvorming ook invloed heeft op de rolweerstand, wordt voor dit onderzoek gekozen om alleen te kijken naar vlakheid in de lengterichting oftewel de langsvlakheid, aangezien deze invloed groter wordt ingeschat. De langsvlakheid wordt meestal gemeten als IRI waarde (International Roughness Index). Dit is een internationaal erkende rekenmethode die variatie in de vlakheid per weglengte uitdrukt. Verschillende metingen kunnen worden gebruikt om een IRI waarde te berekenen. Er kan een wegprofiel met de hand worden ingemeten, maar ook met behulp van lasers. De eenheid is m/km en de waarde in Nederland varieert tussen 0,5 en 3,5, maar bij een waarde van hoger dan 2,1 moet reeds onderhoud worden ingepland. Deze IRI-waarde geeft een gemiddelde waarde van de oneffenheden van het wegvak over 100 m gemeten. De meetmethode is gevoelig voor golflengtes van ongeveer 0,6 tot 90 m.

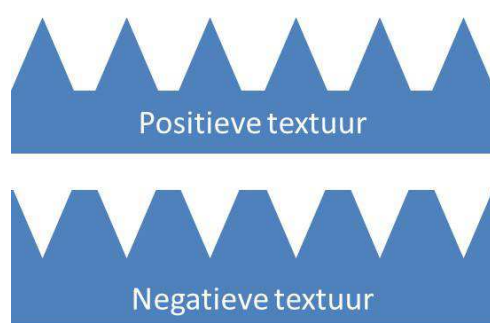
Het bovenstaande laat zien dat de MPD waarde en de IRI waarde samen net niet alle golflengtes beslaan die relevant zijn volgens Figuur 3-1, het gebied tussen 200 en 600 mm valt buiten deze metingen. Het valt dus aan te bevelen om in toekomstig onderzoek ook metingen uit te voeren in het gebied tussen 200 en 600 mm.

In [12] wordt verondersteld dat de wegdekvlakheid ook van invloed is op het brandstofverbruik van een voertuig doordat de oneffenheden in het wegdek leiden tot energieverlies in de schokdempers van het voertuig. Deze verliezen zijn in dit geval niet af te leiden uit de rolweerstand, maar moeten via andere methoden worden bepaald.

De kortgolvige onvlakheden (0,5 tot 5 m) blijken een belangrijk effect te hebben op de rolweerstand. Naarmate de golflengtes groter worden kan het effect op de rolweerstand worden verwaarloosd [13]. De grote onvlakheden (grote golflengtes) kunnen beter worden gedefinieerd als hellingen en hebben via die weg invloed op het brandstofverbruik van passerend verkeer.

Verder kan ook een positieve of een negatieve textuur van het wegdekoppervlak invloed hebben op de bandwegdekinteractie [5]. Een positieve textuur betreft wegooppervlakten waarbij het oppervlak door omhoogstekende steenslag wordt gevormd. Een negatieve textuur wordt gevormd door uithollingen in het vlakke

oppervlak, zie Figuur 3-2. Dichtasfalt beton heeft doorgaans een positieve textuur, die gedurende de levensduur steeds positiever wordt. Open deklagen zoals ZOAB hebben een negatieve textuur. Een negatieve textuur zou een gunstiger effect hebben op de rolweerstand. Een mogelijke verklaring voor de hogere rolweerstand bij een positieve textuur is dat er meer vervorming in een band optreedt doordat de positieve textuur van het asfalt in de band dringt. Deze constatering lijkt overigens Figuur 3-1 enigszins tegen te spreken, aangezien deze positieve of negatieve textuur zich af lijkt te spelen op mm niveau, terwijl volgens de figuur de rolweerstand pas vanaf golflengte van 10 mm speelt. Om deze reden is het verstandig om Figuur 3-1 te zien als richtwaarde en niet als absolute waarheid. Er is op dit moment nog geen standaard meting om het verschil in positieve of negatieve textuur vast te stellen. Recent inzicht geeft aan dat de verhouding tussen de RMS waarde en de MPD waarde kan worden gebruikt als maat voor positieve of negatieve textuur.



Figuur 3-2 Verschil tussen positieve en negatieve textuur.

In het onderzoek zal onderscheid worden gemaakt naar de wegdekkenkarakteristiek textuur via de MPD, de RMS en de MTD waarde. Voor onvlakheid zal gekeken worden naar de IRI-waarde. Er is geen standaard meetmethode om na te gaan of er sprake is van een positieve of negatieve textuur.

3.2.2 *Degradatie van het wegdekoppervlak*

De textuur van het wegoppervlak en de vlakheid en dus de rolweerstand, zijn levensduurafhankelijk. Door degradatie van het wegdek zal de textuur en/of de vlakheid van het wegdek in de tijd veranderen. Een voorbeeld hiervan is het loskomen van steentjes bij het schade-mechanisme rafeling, waardoor de macrotextuur verandert. Daarnaast kunnen door verzakkingen van de ondergrond tijdens de gebruiksfase onregelmatigheden in het wegdek ontstaan die het langsprofiel van het wegdek beïnvloeden. Ook kunnen onregelmatigheden in dwarsrichting ontstaan, namelijk spoorvorming.

3.2.3 *Stijfheid van de weg*

Macrodeformaties van het wegdek brengen ook energieverliezen met zich mee die leiden tot rolweerstand. Dit fenomeen wordt in verschillende studies beschreven. In [2] wordt gesteld dat een rollende band een drukgolf in het wegdek (voorzijde en ernaast) creëert en almede een statische druk onder de band. Hierdoor wordt energie in het wegdek gedissipeerd wat een bepaalde bijdrage aan de rolweerstand heeft. In [6] wordt de doorbuiging van het wegdek als gevolg van belasting op het oppervlak als invloedfactor voor de rolweerstand benoemd, dit wordt ook beschreven in [14]. Het gepresenteerde voorbeeld impliceert dat een flexibeler wegdek een hogere rolweerstand heeft, omdat door het indeuken van het wegdek

het wiel van het voertuig continue een 'berg aan het beklimmen' is en dus een helling moet overwinnen. Er is door onderzoekers van MIT recent een model opgesteld om de extra energie consumptie van dit effect in te schatten [15]. In de presentatie van Lopez Arteaga [16] wordt gesteld dat de rolweerstand van flexibele wegdekken afhangt van dynamische stijfheid van het wegdek en dat minder rolweerstand minder geluid oplevert.

In het verlengde van de stijfheid van het wegdek wordt de temperatuur van de constructie in [18] als parameter voor de rolweerstand benoemd. Bitumen, het bindmiddel van asfalt, is een viskeus materiaal. Bij een viskeus materiaal is de vervorming afhankelijk van de materiaaleigenschappen, de belastingduur en belastingtemperatuur. Zo wordt in [18] gesteld dat beton een E-modulus heeft van $\sim 30.000 \text{ N/mm}^2$ (druksterkte) en de elasticiteitsmodulus van asfalt varieert van $\sim 3000 \text{ N/mm}^2$ (bij $+30^\circ\text{C}$) tot $\sim 10.000 \text{ N/mm}^2$ (bij $+5^\circ\text{C}$) en dus flexibeler is bij hogere temperaturen. Er wordt daarom bij hogere temperaturen een hogere rolweerstand verwacht voor asfaltwegdekken.

3.2.4 *Open en dichte deklagen*

Door het rollen van een band vindt luchtverplaatsing plaats. Een luchtverplaatsing in combinatie met het soort weg waarop gereden wordt, zal ook invloed hebben op de rolweerstand bijvoorbeeld vanwege het opsluiten van lucht in de poriën. Op dit moment wordt door bandenexperts het effect onderzocht van lucht rondom een band bij een open wegdek in vergelijking met een dicht wegdek. De verwachting is dat dit een gering effect betreft in verhouding tot de andere invloedfactoren. Er is echter geen literatuur bestudeerd op dit onderwerp.

3.3 **Wegdek factoren specifieke invloed**

3.3.1 *Invloed van de textuur*

In [8] is gekeken naar het effect van de textuur op het energieverbruik. Om het effect van de textuur te onderzoeken zijn twee type afwerking onderzocht, namelijk normaal dicht asfalt met een MTD waarde van 0,16 mm en een Dense Bitumen Macadam (DBM) met een MTD waarde van 0,60 mm. Een toename van 0,44 leidde tot een verschil in rolweerstandcoëfficiënten van 0,0135 naar 0,0140. Het gemiddelde gemeten verschil in rolweerstand is 0,0005 of wel 3,6%, als dit wordt omgerekend naar brandstofverbruik leidt dit tot een verschil van 0,72 %.

In de presentatie van Lopez Arteaga [16] worden de onderzoekresultaten van een onderzoek op de proefvakken bij Kloosterzande gepresenteerd. Hierbij komt naar voren dat 1 mm minder RMS Texture Depth leidt tot 10% minder rolweerstand en 2% minder brandstofverbruik.

In [18] is onderzoek gedaan naar het verschil in brandstofverbruik van een asfalt (type SMA) en een betonnen wegdek. Er wordt geen informatie gegeven over de opbouw van beide wegdekken. Er is onderscheid gemaakt tussen personenauto's en vrachtverkeer. De testen zijn op een bestaande weg uitgevoerd met behulp van meetwagens. De conclusie van dit onderzoek is dat er gemiddeld 1,1% minder brandstofverbruik is gemeten bij het betonnen wegdek ten opzichte van het asfaltwegdek voor personenauto's. Dit verschil wordt toegekend aan de verschillen in de MPD waarde, op basis van berekeningen gemaakt met het VETO model. De textuur (MPD) liet een hogere waarde zien voor asfalt van ongeveer 50%, namelijk 0,92 voor asfalt en 0,50 voor beton. De andere geregistreerde

meetwaarden van de wegdekkarakteristieken (spoorvorming, IRI, en helling) laten ook verschillen zien. De verschillen in spoordiepte (~20%; grotere spoordiepte voor asfalt) en IRI-waarden (~60%; grotere onvlakheid voor beton) hebben volgens dit model een beperkte invloed. De helling tussen de asfalt en betonnen weg was nauwelijks verschillend (~2% verschil tussen de wegdekken). Bij de vrachtwagenmetingen van hetzelfde onderzoek [18] wordt 6,7% minder brandstofverbruik gevonden voor het betonnen wegdek. De verminderde rolweerstand van het betonnen wegdek wordt naast de MPD waarde ook toegeschreven aan de verschillen in stijfheid van de wegdekken. In 3.3.3 zal in meer detail worden teruggekomen op de invloed van de stijfheid.

In het literatuuronderzoek van Haaster [5] worden modellen geciteerd waar bij een toename van 0,2 mm in MPD waarde, een toename van 6% in de rolweerstand gevonden en een verschil van 1 eenheid in RMS leidt tot een toename in rolweerstand van 7%. Er worden echter ook praktijkdata gepresenteerd waarin het effect van de MPD waarde en de RMS waarde kleiner is. De studie concludeert dat modellen en praktijkmetingen nog niet goed op elkaar aansluiten.

Op basis van de ook in [5] gebruikte metingen uit Kloosterzande wordt in [9] geconcludeerd dat de rolweerstandcoëfficiënt tussen een geringe textuurdiepte van 0,3 mm en een grote textuurdiepte van ruim 2 mm ongeveer 15% bedraagt. Meer algemeen wordt gesteld dat metingen in textuurdiepte variëren tussen de 0,3 en 3 mm leiden tot verschil in gemeten rolweerstandcoëfficiënt van 8 tot 84%.

In [9] wordt ook opgemerkt dat voor slijtlagen een 1,4 tot 1,8 keer grotere rolweerstand wordt gemeten. Er wordt aangenomen dat dit veroorzaakt wordt door de positieve textuur van deze slijtlagen. Er wordt aangenomen dat dit verschil te wijten is aan de uitstekende puntjes die de band vervormen.

In [13] zijn enkele onderzoeken benoemd die de effecten van een asymmetrische textuur van het oppervlak hebben onderzocht. De conclusies geven aan dat er een relatie is tussen de vorm van textuur en de rolweerstand; hoe scherper de oneffenheden hoe hoger de rolweerstand, en de aggregaat grootte; kleiner is beter.

In [18] is aan de hand van het VTI model het effect van de textuur (MPD-waarde) op het brandstofverbruik gemodelleerd. Volgens deze gegevens neemt bij een toename van eenheid in MPD, het gesimuleerde brandstofverbruik, bij een gemiddelde snelheid van 90 km/h, als volgt toe:

- auto: 2,8 %
- vrachtwagen: 3,4 %
- vrachtwagen met aanhanger: 5,3 %.

In [19] PMP/MPD is gemeten voor 3 nieuw wegdekken en twee referentieswegen (provinciaal weg en 250 km snelweg) binnen 3 jaar. De metingen zijn volgens de Gdansk methode gedaan voor drie banden types. Volgens de resultaten van dat onderzoek heeft de referentie snelweg een hogere rolweerstand dan de nieuwe wegen omdat de MPD van de referentie snelweg hoger (0,95mm) is dan de MPD van de nieuwe wegen (0,55-0,6 mm).

Volgens de resultaten van [20] en [21] MPD blijkt de belangrijkste factor die rolweerstand controleert. De resultaten zijn op “Functional data analysis”(FDA) gebaseerd. In [21] is het ook getoond dat MPD is de eenvoudigste manier om de een textuur meting te krijgen van laser profiel data.

In [22] is het HDM4 brandstofverbruikmodel en bandenslijtagemodel gebruikt om het effect van wegcondities op het brandstofverbruik en bandenslijtage met het model te voorspelen. Het blijkt dat de MPD geen invloed op passagierauto's heeft maar dat er wel een invloed voor vrachtwagens wordt gevonden. Namelijk, een MPD stijging van 1 mm brengt een verhoging in brandstofverbruik 1,5% voor vrachtwagen in een snelweg (88 km/h) en van 2% voor vrachtwagen in een normaal weg (56 km/h).

De invloed van textuur op de rolweerstand is in de verschillende onderzoeken op verschillende manieren bepaald. Hierdoor zijn de resultaten niet zonder meer met elkaar vergelijkbaar. Om ze toch met elkaar te kunnen vergelijken zijn de waarden via twee stappen genormaliseerd. In de eerste stap zijn met behulp van formule (3) de waarden die uitgedrukt waren in rolweerstand vertaald naar brandstofbesparing. Vervolgens is de gemeten invloed op het brandstofverbruik in procenten met behulp van linearisering omgerekend naar de range die deze parameter in de weg kan aannemen. De ranges die de textuur kan aannemen staan beschreven in paragraaf 3.2.1. Ter illustratie van deze stappen wordt het volgende voorbeeld gegeven. In [8] staat beschreven dat als de MTD waarden met 0,44 mm varieert, de rolweerstand 3,6% toeneemt. Eerst is deze 3,6% verschil in rolweerstand vertaald naar 0,72% brandstofverbruik met behulp van formule (3). De range die de MTD waarde in de praktijk kan aannemen is 0,5 – 2 mm, dus een bereik van 1,5 mm. Het onderzoek kijkt naar een verschil van 0,44 mm MTD, dus als dit verschil lineair wordt uitgesmeerd over de hele range, dan kan er een besparing in brandstofverbruik worden gerealiseerd van $(1,5/0,44)*0,72 = 2,5\%$ als de MTD waarde van 2 mm wordt teruggebracht naar 0,5 mm.

In Tabel 1 is een overzicht gegeven van de beschreven invloed op brandstofverbruik, omgerekend naar genormaliseerde waarden. In deze tabel is te zien dat de invloed van textuur, zoals deze op dit moment wordt bepaald, varieert tussen 1,6% en 16,8%, waarbij zoals verwacht duidelijk verschil te zien is tussen vrachtverkeer en personenverkeer. De gemiddelde invloed is 7% op brandstofverbruik. De waarde van 39,9% is buiten beschouwing gelaten, omdat deze niet geheel aan de textuur kan worden toegeschreven.

Tabel 1: Overzicht van invloed van verschillende textuurmetingen op brandstofverbruik

Bron	Parameter	Eenheid	Voertuig	Delta	Procentueel rolweerstand	Procentueel brandstofverbruik	Range	Involed range	Opmerkingen
[8]	MTD	mm	-	0,44	3,6%	0,72%	0,5	2	2,5%
[16]	RMS	mm	-	1	10,0%	2,00%	0,4	2	3,2%
[17]	MPD	mm	personen	0,42		1,10%	0,3	2,5	5,8%
[17]	MPD	mm	vracht	0,42		6,70%	0,3	2,5	35,1%
[5]	MPD	mm	-	0,2	6,0%	1,20%	0,3	2,5	13,2%
[5]	RMS	mm	-	1	7,0%	1,40%	0,4	2	2,2%
[9]	MPD	mm	-	2,5	8,0%	1,60%	0,3	2,5	1,4% Ondergrens
[9]	MPD	mm	-	2,5	84,0%	16,80%	0,3	2,5	14,8% Bovengrens
[9]	textuur	-	-	?	60,0%	12,00%			12,0%
[18]	MPD	mm	personen	1		2,80%	0,3	2,5	6,2%
[18]	MPD	mm	vracht	1		5,30%	0,3	2,5	11,7%
[19]	MPD	mm		0,4	10,0%	2,00%	0,3	2,5	11,0%
[22]	MPD	mm	vracht 88 km/h	1		1,50%	0,3	2,5	3,3%
[2]	MPD	mm	vracht 56 km/h	1		2,00%	0,3	2,5	4,4%

3.3.2 Invloed van onvlakheid

In [12] is onderzoek gedaan naar het effect van de onvlakheid van een weg op het brandstofverbruik. Hierbij heeft een testserie plaatsgevonden voorafgaand aan het opnieuw asfalteren van het wegdek. Deze testen zijn op een proefvak uitgevoerd met behulp van meetwagens. Voor het asfalteren was de IRI waarde 2,1 na het asfalteren was de IRI waarde 1,0. De conclusie van dit onderzoek, gebaseerd op de verzamelde data van dieseltrucks in deze studie, is dat een nieuw glad wegdek een afname van 2,5% in brandstofverbruik levert. In dit onderzoek zijn de variabelen als macrotextuur en stijfheid van de weg niet meegenomen, alle gemeten verschillen worden dus toegedicht aan de IRI waarde.

Uit het literatuuronderzoek van Haaster [6], leidt een verschil van 1 eenheid in IRI waarde tot een toename van 6% in rolweerstand. Dit wordt vertaald in 1,2% van het brandstofverbruik.

In het artikel van Groenendijk [9], wat ook een literatuurstudie is, wordt gesteld dat een verschil van in IRI waarde van 1,1 (van 2,1 naar 1) leidt tot een afname van 1 tot 2,5% van het brandstofverbruik.

In [18] is aan de hand van het VTI model het effect van de onvlakheid (IRI-waarde) op het brandstofverbruik gemodelleerd. Volgens deze gegevens neemt bij een toename van de IRI waarde met één eenheid, het gesimuleerde brandstofverbruik, bij een gemiddelde snelheid van 90 km/h, als volgt toe:

- auto: 0,8 %
- vrachtwagen: 1,3 %
- vrachtwagen met aanhangen: 1,7 %.

In [22] is het HDM4 brandstofverbruikmodel en bandslijtagemodel gebruikt om de effect van wegecondities aan brandstofverbruik en bandslijtage te relateren. Het blijkt dat onvlakheid (IRI-waarde) daarin een zeer belangrijke factor is. Namelijk, een IRI-waarde stijging van 1m/km brengt een verhoging in brandstofverbruik van 2% voor auto's, van 1% voor vrachtwagen in een snelweg (94 km/h) en van 2% voor vrachtwagen in een normaal weg (56 km/h).

De invloed van onvlakheid op de rolweerstand is in de verschillende onderzoeken op verschillende manieren bepaald. Hierdoor zijn de resultaten niet zonder meer met elkaar vergelijkbaar. Om ze toch met elkaar te kunnen vergelijken zijn de waarden via twee stappen genormaliseerd. In de eerste stap zijn met behulp van formule (3) de waarden die uitgedrukt waren in rolweerstand vertaald naar brandstofbesparing, hierdoor zijn alle invloeden uitgedrukt in brandstofbesparing. Vervolgens is de gemeten invloed op het brandstofverbruik in procenten met behulp van linearisering omgerekend naar de range die deze parameter in de weg kan aannemen. De range die onvlakheid kan aannemen staat beschreven in paragraaf 3.2.1. Ter illustratie van deze stappen wordt in paragraaf 3.3.1 een voorbeeld gegeven.

In Tabel 2 is een overzicht gegeven van de beschreven invloed op brandstofverbruik, omgerekend naar genormaliseerde waarden. In deze tabel is te zien dat de invloed van onvlakheid uitgedrukt in IRI waarde varieert tussen 1,3 en 3,6%, waarbij zoals verwacht duidelijk verschil te zien is tussen vrachtverkeer en personenverkeer. De gemiddelde invloed van de IRI waarde is 2,5% op brandstofverbruik. De waarde van 3,6% die als bovengrens wordt genoemd in [9] is buiten beschouwing gelaten, omdat deze waarschijnlijk refereert naar de waarde die al is opgenomen uit [12]. Er aangenomen dat 2,1 de bovengrens van de range is, omdat dit de grenswaarde is waarbij onderhoud aan de weg wordt ingepland. Bij het ontwerp van een weg zal men immers nooit een weg aanleggen die slechter presteert dan de onderhoudsgrens.

Tabel 2: Overzicht van invloed van onvlakheidmetingen op brandstofverbruik

Bron	Parameter	Eenheid	Voertuig	Delta	Procentueel rolweerstand	Procentueel brandstofverbruik	Range	Invloed range	Opmerkingen
[5]	IRI	m/km	-	1	6,0%	1,20%	0,5 2,1	1,9%	
[9]	IRI	m/km	-	1,1		1,00%	0,5 2,1	1,5%	Ondergrens
[9]	IRI	m/km	-	1,1		2,50%	0,5 2,1	3,6%	Bovengrens
[12]	IRI	m/km	-	1,1		2,50%	0,5 2,1	3,6%	De textuur zal ook zijn verbeterd, dus overschatting is waarschijnlijk
[18]	IRI	m/km	personen	1		0,80%	0,5 2,1	1,3%	
[18]	IRI	m/km	vracht	1		1,70%	0,5 2,1	2,7%	
[22]	IRI	m/km	personen	1		2,00%	0,5 2,1	3,2%	
[22]	IRI	m/km	vracht 94 km/h	1		1,00%	0,5 2,1	1,6%	
[22]	IRI	m/km	vracht 56 km/h	1		2,00%	0,5 2,1	3,2%	

3.3.3 Invloed van de stijfheid

In [8] is onderzoek verricht om vast te stellen of de stijfheid van het wegdek een significante invloed heeft op het energieverbruik dat nodig is om over het wegdek te rijden en of het bouwen van een stijvere wegdek aantoonbare voordelen oplevert voor brandstofbesparing. Er zijn twee wegdekconstructies onderzocht in de TRL Pavement Test Facility (PTF). Het onderzoek is zo opgezet dat het ene wegdek een relatief stijve constructie is terwijl het andere wegdek een relatief flexibele constructie is. In het onderzoek wordt geschat dat het stijve wegdek een E-modulus heeft van 18.000 N/mm^2 en het slappe wegdek van ongeveer 7.000 N/mm^2 . Van beide constructies is de verplaatsing bepaald met een Falling Weight Deflectometer (FWD) bij een belasting van 50kN en 75kN. De rolweerstand is bepaald met de PTF en leidde tot een gemiddelde rolweerstandcoëfficiënt voor de stijve constructie van 0,008326 (sd 0,000616) en voor de flexibel veronderstelde constructie 0,008822 (sd 0,001077). Het verschil van de rolweerstandcoëfficiënt is gemiddeld genomen 0,0005 of wel 5,7%. Dit verschil is in de zelfde orde grootte als

de standaarddeviatie en is daarom als niet statistisch significant aangemerkt. Alhoewel aan wordt gegeven dat deze waarde niet statistisch significant is wordt deze wel meegenomen in het overzicht, aangezien het een van de weinige gekwantificeerde waarden is en niet in alle gevallen duidelijke is of andere gemeten verschillen wel statistisch significant zijn.

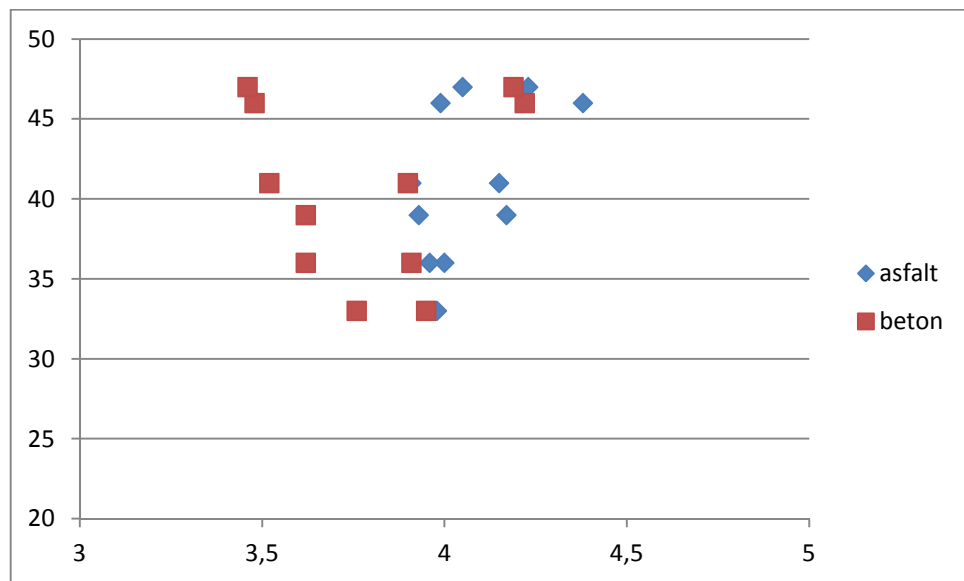
Lopez Arteaga stelt in haar presentatie [16] dat de rolweerstand van flexibele wegdekken afhangt van dynamische stijfheid van het wegdek. Een aanbeveling van dit onderzoek is meer onderzoek uit te voeren naar de invloed van dynamische stijfheid op rolweerstand om deze relatie beter te kunnen kwantificeren. Daarnaast wordt in dit onderzoek gesteld dat minder rolweerstand leidt tot minder geluid.

In [23] is de invloed van de stijfheid vanuit een andere hoek bekeken. Er zijn metingen verricht naar de stijfheid van asfalt - en portlandcementbetonwegen. De paper richt zich op het verlies van energie in het wegdek. Het energieverlies in het wegdek is bepaald door op een proefvak Falling Weight Deflectometer (FWD) metingen uit te voeren. Uit deze metingen blijkt een portlandcement wegdek tot 4x minder energieverlies op te leveren dan een asfaltwegdek bij de gemiddelde jaartemperatuur. Dit onderzoek maakt dus enkel aannemelijk dat de in een asfaltwegdek meer energie gedissipeerd wordt dan in een betonnen wegdek. Het relatieve deel van de rolweerstand die in verband kan worden gebracht met energiedissipatie wordt niet gegeven, waardoor deze verschillen niet zijn te vertalen naar rolweerstand.

In [24] is een studie verricht naar de effecten van stijfheid op de rolweerstandcoëfficiënt. Het onderzoek betreft het vergelijken van de rolweerstandcoëfficiënt bepaald met de TUG trailer op een SMA 0/16 wegdek en een betonnen wegdek. Het onderzoek concludeert dat het betonnen wegdek een iets lagere rolweerstandcoëfficiënt (verschil rolweerstandcoëfficiënt van 0,00005) geeft, eerder als gevolg van de lagere macrotextuur dan door de stijfheid. De metingen zijn uitgevoerd bij een omgevingstemperatuur van 9°C.

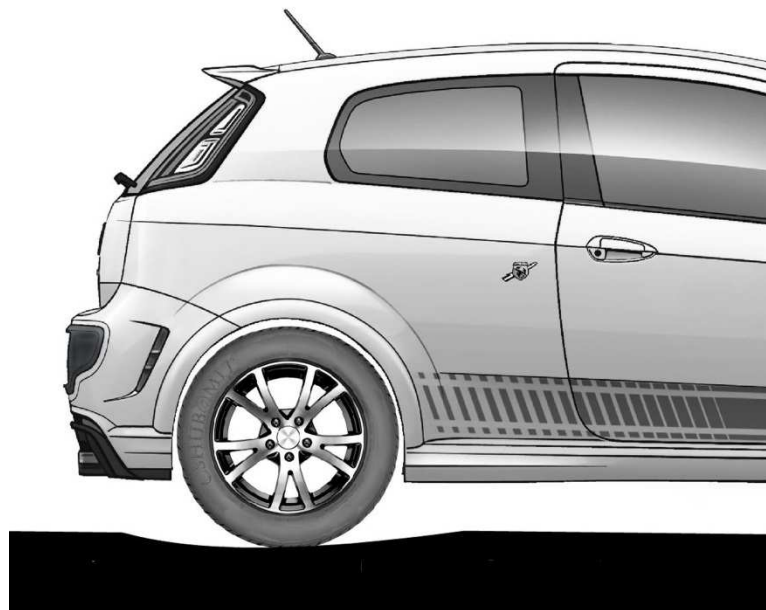
In een [8, 12, 18, 23] is de wegdektemperatuur gemeten van verschillende typen wegdekken om na te gaan of er verschillen in temperatuur van invloed kunnen zijn van tussen wegdektypen. In [18] reeds genoemd in 3.3.1 werd al aangegeven dat een bij vrachtwagenmetingen 6,7% minder brandstofverbruik bij betonnen wegdek gevonden, in vergelijking met een asfaltwegdek. Een gedeelte van het gevonden verschil kan worden toegeschreven aan de MPD waarde, maar er wordt ook een gedeelte toegeschreven aan de verschillen in stijfheid van de wegdekken, de relatieve invloed van beide parameters wordt niet gekwantificeerd. Op basis van dit onderzoek wordt gesteld dat het brandstofverbruik op een asfaltwegdek toeneemt naarmate de oppervlaktetemperatuur van het wegdek toeneemt. De resultaten uit het onderzoek zijn in Figuur 3-3 weergegeven. In de figuur is voor asfalt een hele lichte korrelatie te zien tussen het brandstofverbruik en de wegdektemperatuur, deze korrelatie lijkt in mindere mate aanwezig voor het betonnen wegdek. Er is niet onderzocht of deze verschillen statistisch significant zijn. De temperaturen waarbij is gemeten zijn relatief hoog (32 - 47°C). Verder moet worden opgemerkt dat de temperatuur ook invloed heeft op de rolweerstand van de banden. Data van de stijfheid van de wegdekken wordt ook niet gegeven in de paper. Vanwege de beperkte omvang van de dataset en het grote aantal onbekende variabelen wordt

op dit moment geoordeeld dat de invloed van temperatuur van het asfaltwegdek nog onvoldoende is aangetoond.



Figuur 3-3 Brandstofverbruik (l/10km) x-as, vs Temperatuur (°C) y-as

Er is recent een studie uitgekomen van MIT naar de invloed van doorbuiging van het wegdek op het brandstofverbruik [16]. Deze studie kijkt naar het effect van het voertuig dat continue een 'berg aan het beklimmen' is, doordat het wegdek doorbuigt onder de belasting van het voertuig, zoals schematisch is weergegeven in Figuur 3-4. Een flexibeler wegdek (met een lagere stijfheid) zal leiden tot een grotere doorbuiging en dus een grotere helling wat leidt tot een hoger brandstofverbruik.



Figuur 3-4 Berg die ontstaat door belasting gewicht voertuig [25].

In de studie is een model gemaakt van het effect van doorbuiging van het wegdek op brandstofverbruik van het voertuig. Vervolgens is een database gemaakt van stijfheden van asfalt en betonnen wegdekken op basis van Falling Weight Deflection metingen. Met behulp van een MonteCarlo simulatie zijn alle resulterende doorbuigingen voor een asfalt en een betonnen wegdek onder invloed van een personenvoertuig en een vrachtwagen berekend. Met behulp van het model zijn deze doorbuigingen omgerekend naar brandstofverbruik. Hierdoor is een gemiddeld verschil berekend voor het verschil in brandstofverbruik tussen een asfalt en een betonnen wegdek op basis van doorbuiging, voor zowel een personenwagen als een vrachtwagen. Het verschil is uitgedrukt in absoluut brandstofverbruik en bedraagt 0,01 liter/100km (sd 0,007) voor een personenvoertuig en 0,061 liter/100km (sd 0,042) voor een vrachtwagen. Het totale brandstofverbruik van een personenwagen zit rond de 7 liter/100km en het verbruik van een vrachtwagen rond 30 liter/100km. De door het model berekende verschillen zijn dus ongeveer 2 promille van het totale brandstofverbruik. Het persbericht dat verwijst naar dit onderzoek [25] spreekt over een reductie van het brandstofverbruik van maximaal 3%. Navraag bij de betrokken onderzoekers van MIT wijst uit dat er wordt geschat dat er 3% besparing kan worden gerealiseerd indien het wegennet in goede staat van onderhoud wordt gehouden, dit geldt dan zowel voor asfalt- als betonwegdekken.

De invloed van stijfheid op de rolweerstand is in de verschillende onderzoeken op verschillende manieren bepaald. Hierdoor zijn de resultaten nauwelijks vergelijkbaar. Om ze toch met elkaar te kunnen vergelijken zijn de waarden die konden worden gekwantificeerd, via twee stappen genormaliseerd. In de eerste stap zijn met behulp van formule (3) de waarden die uitgedrukt waren in rolweerstand vertaald naar brandstofbesparing, hierdoor zijn alle invloeden uitgedrukt in brandstofbesparing. Vervolgens is de gemeten invloed op het brandstofverbruik in procenten met behulp van linearisering omgerekend naar de range die deze parameter in de weg kan aannemen. De range die de stijfheid kan aannemen staat beschreven in paragraaf 3.2.3. Ter illustratie van deze stappen wordt in paragraaf 4.2.1 een voorbeeld gegeven.

De invloed van stijfheid is in [26] bestudeerd en de conclusie is dat ze konden een verschil tussen asfalt en stijf wegdekken niet vinden en sterker nog konden ze dit verschil niet verklaren.

In Tabel 3 is een overzicht gegeven van de beschreven invloed op brandstofverbruik, omgerekend naar een vergelijkbare waarden. Uit de tabel blijkt dat er weinig kwantitatief onderzoek is gedaan naar de invloed van stijfheid van wegdekken op rolweerstand en het brandstofverbruik. De relatieve invloed is hierdoor ook nauwelijks gekwantificeerd. Daarnaast hebben twee waarden die genoemd zijn in Tabel 3 een kanttekening die aangeeft dat niet betrouwbaar zijn. Samengevat kan worden gesteld dat er aanwijzingen zijn dat de stijfheid van het wegdek invloed kan hebben op de rolweerstand, maar dat er op dit gebied meer onderzoek nodig is. Op basis van de waarden kan de potentiële invloed van de stijfheid worden geschat op 0 - 3%.

Tabel 3: Overzicht van invloed van stijfheid wegdek op brandstofverbruik

Bron	Parameter	Eenheid	Voertuig	Delta	Procentueel rolweerstand	Procentueel brandstofverbruik	Range	Invloed range	Opmerkingen
[1]	Stijfheid	N/mm ²	-	11000	5,7%	1,1%	3000 30000	2,8%	Resultaten niet statistisch significant
[22]	Stijfheid	N/mm ²	-	0	0,0%	0,0%		0,0%	
[4]	Stijfheid	N/mm ²	vracht	?		6,7%		6,7%	Stijfheden van de wegdekken zijn onbekend, gedeelte is te wijten aan textuur
[27]	Stijfheid	N/mm ²	-	?		0,2%		0,2%	

3.3.4 Open en dichte deklagen

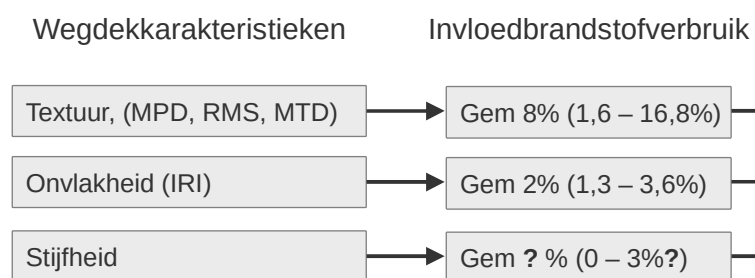
Onderzoek naar het effect van open en dichte deklagen op de rolweerstand zijn niet gevonden.

3.3.5 Invloed wegdekcondities

In [5] komt naar voren dat, onder stedelijke omstandigheden, een nat wegdek resulteert in hoger brandstofverbruik. In dit onderzoek is het relatieve effect op het brandstofverbruik tussen een droog en nat wegdek niet gegeven. In [13] worden een aantal onderzoeken genoemd die het effect van sneeuw en water op de rolweerstand hebben onderzocht. Volgens deze studie verhoogt water op het wegdek het brandstofverbruik met tenminste 10%. Goede afwatering, eventueel door opendeklagen heeft dus waarschijnlijk een gunstige invloed heeft op de het brandstofverbruik.

3.4 Samengevatte invloed van wegdekkarakteristieken op brandstofverbruik

Indien de invloed van wegdekkarakteristieken samen wordt genomen is het duidelijk dat de wegdektextuur de grootste invloed heeft op het brandstofverbruik, daarna komen onvlakheid en stijfheid. Indien alle bestudeerde onderzoeken worden samengenomen zoals is gedaan in de tabellen in de voorgaande paragraaf is het mogelijk om een kwantitatieve inschatting te maken van de invloed van de verschillende wegdekkarakteristieken op het brandstofverbruik van passerende voertuigen. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 3-5.



Figuur 3-5: Invloed wegdekkarakteristieken op brandstofverbruik.

Volgens de literatuur is de textuur is met afstand de belangrijkste parameter die invloed heeft op het brandstofverbruik. Op dit moment kan dus de grootste winst met betrekking tot brandstofverbruik worden gerealiseerd door optimalisatie van de textuur van een wegdek.

4 Modellen

4.1 Inleiding

Met behulp van modellen kan goed inzicht worden verkregen in de relatieve invloed van verschillende parameters op het brandstofverbruik.

In de literatuur wordt meerdere malen gesproken over het VETO model, ontwikkeld door VTI. Met behulp van dit model kan het brandstofverbruik van een voertuig worden berekend, rekening houdende met de verschillende omstandigheden (luchtweerstand, snelheid, type voertuig, verloop van de weg) [18]. In dit model is de rolweerstand (op basis van MPD en IRI-waarde) van de weg meegenomen om de het brandstofverbruik te schatten en geeft een theoretische relatie tussen de oppervlakeigenschappen en de rolweerstand.

4.2 Modellen voor rolweerstandcoëfficiënten

In de literatuur worden een aantal wiskundige modellen voorgesteld om wegdekarakteristieken in een formule te omvatten voor het bepalen van de rolweerstandcoëfficiënt. De modellen zijn gedefinieerd op basis van beschikbare data uit onderzoek. Op basis van de data is een factor geformuleerd die de correlatie met de rolweerstandcoëfficiënt weergeeft. Deze modellen geven allen de kanttekening dat verder onderzoek noodzakelijk is om de modellen verder te valideren.

In [13] worden een aantal onderzoeken gepresenteerd die een relatie leggen tussen de rolweerstandcoëfficiënt, de textuur, de onvlakheid en de snelheid.

Uit metingen met een drum facility is de relatie de rolweerstandcoëfficiënt, de textuur en de snelheid als volgt aangegeven:

$$C_{rr} = 0,01065 + 0,002012 \cdot \text{MPD} + 0,00064 \cdot \text{MPD} \cdot (v-20)$$

C_{rr} = Rolweerstandcoëfficiënt

v = snelheid in m/s

MPD = MPD waarde in mm

Metingen volgens de coastdown methode geven de volgende relatie de rolweerstandcoëfficiënt, de textuur, de onvlakheid en de snelheid:

Voor personenauto's:

$$C_{rr} = 0,0148 + 0,0020 \cdot \text{MPD} + 0,00064 \cdot \text{IRI} + 0,00005 \cdot \text{IRI} \cdot (v-20)$$

Voor vrachtwagens:

$$C_{rr} = 0,0061 + 0,0014 \cdot \text{MPD} + 0,00095 \cdot \text{IRI} + 0,000076 \cdot \text{IRI} \cdot (v-20)$$

C_{rr} = Rolweerstandcoëfficiënt

v = snelheid in m/s

MPD = MPD waarde in mm

IRI = IRI waarde voor onvlakheid in m/km

In [24] zijn de invloeden van de macrotextuur en de onvlakheid van het wegdek op rolweerstandscoefficiënt en brandstofverbruik van een personenauto en een vrachtwagen onderzocht met de coastdown methode. De bijdrage van de macrotextuur en de onvlakheid op de rolweerstandscoefficiënt kan als volgt worden uitgedrukt:

$$C_{rr} = CrMPD * MPD + CrIRI * IRI + CrIRI_V * IRI * (v - 20)$$

C_{rr} = Rolweerstandscoefficiënt

v = snelheid in m/s

MPD = MPD waarde in mm

IRI = IRI waarde voor onvlakheid in m/km

Voor personenauto's zijn de geschatte coëfficiënten (met 95% betrouwbaarheid) als volgt :

$$CrMPD = 0,00172$$

$$CrIRI = 0,000466$$

$$CrIRI_V = 0,0000365$$

Dit leidt tot de formule:

$$C_{rr} = 0,00172 * MPD + 0,000466 * IRI + 0,0000365 * IRI * (v - 20)$$

De resultaten van de coastdown testen met de vrachtwagen bleken onvoldoende stabiel om de coëfficiënten te destilleren.

In het zelfde document wordt een model gegeven, waarmee de belangrijkste parameters zijn opgenomen om de rolweerstand te bepalen:

$$F_r = F_z * (Cr_{00} + Cr_{MPD} * MPD + Cr_{IRI} * IRI + Cr_{IRI_V} * IRI * v + Cr_{temp} * T)$$

F_r = rolweerstandskracht werkende op de band

F_z = normaalkracht werkende op de band

v = snelheid [m/s]

T = temperatuur van de band [°C]

Cr_{00} = basisfactor rolweerstand

Cr_{MPD} Cr_{IRI} Cr_{IRI_V} Cr_{temp} zijn constanten.

In [25] wordt het volgende model gepresenteerd:

$$C_{rr} = Cr_0 + Cr_1 * IRI * v + Cr_2 * MPD$$

C_{rr} = rolweerstandscoefficiënt

v = snelheid

MPD = de MPD waarde mm

IRI = IRI waarde voor onvlakheid in m/km

Cr_i zijn coëfficiënten die afhankelijk zijn van het type voertuig (passagiers- of vrachtauto) en de banden.

In [22] wordt het volgende model voor lichte voertuigen gegeven:

$$C_{rr} = C + 0,0020 * MPD + X * IRI$$

C_{rr} = rolweerstandscoefficiënt

MPD = de MPD waarde mm

IRI = IRI waarde voor onvlakheid in m/km

X = een constante die nog bepaald moet worden

C = een unieke waarde van een bepaalde band en andere omstandigheden, tussen de 0,008 en 0,012

De stijfheid wordt genoemd als parameter, maar door onvoldoende zekerheid van het effect van de stijfheid op de rolweerstand, is deze niet in het model opgenomen. Voor lichte voertuigen wordt het effect op de rolweerstand van de IRI waarde geschat op 1/3 van het effect van de textuur (de MPD-waarde). Voor zware voertuigen wordt geen schatting gegeven.

4.3 Samenvatting modellen rolweerstand

De modellen die ontwikkeld zijn voor het schatten van de rolweerstand zijn allemaal modellen die gefit zijn op data. Doordat ieder model is gefit op een andere dataset verschillen de coëfficiënten. Alle modellen erkennen de MPD waarde als parameter. De meeste modellen erkennen de IRI-waarde als parameter, waarbij de coëfficiënt voor de IRI-waarde in een aantal gevallen ook afhankelijk is gemaakt van de snelheid. In geen van de modellen is de stijfheid als parameter opgevoerd. De modellen geven geen extra informatie ten opzichte van de onderzoeksresultaten die zijn samengevat in hoofdstuk 3. Echter de relatie tussen MPD en IRI met de rolweerstand kan met behulp van de vergelijkingen gekwantificeerd worden en geeft de mogelijkheid op basis van oppervlakeigenschappen MPD en IRI een inschatting te doen van de rolweerstand. Hierbij dient vermeld te worden dat de gevonden relaties met name gevalideerd zijn voor personenwagens en niet voor vrachtwagens.

5 Optimalisatie mogelijkheden van asfaltmengselontwerp

5.1 Recente studies naar de invloed van het asfaltmengsel op rolweerstand

In het vorige hoofdstuk is beschreven dat rolweerstand voornamelijk wordt beïnvloed door de textuur. Textuur wordt in belangrijke mate beïnvloed door het asfaltmengsel, dit betekent dat door het asfaltmengsel te veranderen de textuur geoptimaliseerd kan worden.

Als gevolg hiervan is in de laatste jaren onderzoek is uitgevoerd naar de invloed van specifieke asfaltmengsels op rolweerstand en de mogelijkheden van asfaltmengsel optimalisatie. De resultaten zullen hieronder worden toegelicht.

In Nederland is een groot aantal wegdekken bemeten [27]. Hieruit blijkt dat er een verschil gemeten kan worden in rolweerstand tot 30% tussen de verschillende (bestaande) wegooppervlakken. Wegdekken met toeslagmateriaalgradering tussen 0/5 en 0/6 hebben $9-11\pm 2\%$ (95% betrouwbaarheidsniveau) minder rolweerstand dan een ZOAB 0/16 mengsel en $7\pm 5\%$ minder dan een SMA 0/11.

In Denemarken is een onderzoek uitgevoerd waarbij mengsels zijn geoptimaliseerd voor een betere textuur [19,28,29]. In het laboratorium [30] zijn eerst enkele combinaties van toeslagmaterialen en vulstoffen getest met als doel de samenstelling te optimaliseren voor duurzaamheid en lage rolweerstand. Uit dit onderzoek kwam naar voren dat, zoals verwacht, er een sterke relatie is tussen de grote van het toeslagmateriaal en het textuurprofiel.

Met twee van de asfaltmengsels uit het laboratoriumonderzoek zijn vervolgens op twee locaties proefvakken aangelegd, welke zijn vergeleken met een referentie SMA 0/8 mengsel. Daarnaast zijn met de opgedane ervaring in de praktijk nog testsecties met verbeterde asfaltmengsels aangelegd. De resultaten laten zien dat de geoptimaliseerde asfaltmengsels een lagere rolweerstand hebben dan het referentiemengsel. In dit onderzoek is een reductie in rolweerstand gevonden van 10 tot 20% afhankelijk van de gekozen meetmethode en mate van optimalisatie van het mengsel, hierbij zijn MPD waardes gerealiseerd van 0,47 tot 0,64.

5.2 Aanbevolen richting voor mengseloptimalisatie met verwachte besparing

In hoofdstuk 3 is reeds aangegeven dat de textuur van het wegdek de grootste invloed heeft op de geobserveerde rolweerstand. Indien de MPD waarde omlaag wordt gebracht van 2 naar 0,5mm, kan een reductie in brandstofverbruik van 8% worden verwacht.

Indien een asfaltmengsel wordt geoptimaliseerd op textuur kan een MPD waarde worden gerealiseerd van 0,5mm; zoals reeds is aangetoond in Denemarken [28]. In Denemarken werd dit bereikt door uit te gaan van een korrelgradering van 0/6mm waarbij vervolgens verder gewerkt is met vulstoffen om de textuur zo fijn mogelijk te maken.

Om een kwantitatieve schatting te maken van de besparing in rolweerstand die in dit geval kan worden gerealiseerd moet een referentiewegdek gekozen worden. Voor een provinciale weg lijkt SMA 0/11 een redelijke referentie. Een SMA 0/11 heeft gemiddeld een MPD waarde van rond de 1,2. Een geoptimaliseerd wegdek levert dus een reductie in MPD waarde met 0,7mm. Indien dit wordt omgerekend naar brandstofverbruik, levert dit een schatting van een reductie in brandstofverbruik van ruim 3%.

6 Conclusies

Dit rapport beschrijft de bevindingen van een literatuurstudie naar de relatieve invloed van wegdekkenkarakteristieken op het brandstofverbruik van passerend verkeer. Het doel van deze studie is om na te gaan of het mogelijk is om keuzes in het ontwerpstadium zo te maken dat de CO₂ uitstoot over de gehele levensduur van de weg omlaag wordt gebracht. In het onderzoek is gekeken welke factoren het brandstofverbruik bepalen en welke van deze factoren beïnvloed worden door het wegdek. Met behulp van deze inzichten is een groot aantal bronnen bestudeerd die verslag doen van de invloed van wegdekkenkarakteristieken op brandstofverbruik. Op basis van de bestudeerde literatuur zijn onderstaande conclusies te trekken.

Het brandstofverbruik van voertuigen wordt bepaald door een groot aantal parameters. Deze zijn gerelateerd aan het voertuig, het wegdek en de opgelegde hellingen uit de omgeving. Een belangrijke parameter hierin is de rolweerstand van het voertuig op de weg. Deze wordt bepaald door de banden, het wegdek en hun onderlinge interactie. Bepalende karakteristieken van het wegdek voor rolweerstand zijn oppervlaktetextuur, langsvlakheid en stijfheid.

Over de relatieve bijdragen van de individuele wegdekkenkarakteristieken aan het brandstofverbruik worden in de literatuur uiteenlopende resultaten gerapporteerd. Er is echter consensus in de onderzoeken dat oppervlaktetextuur de meeste invloed heeft, gevolgd door langsvlakheid en tot slot stijfheid.

De rolweerstand van een wegdek kan beïnvloed worden door het ontwerp van het asfalmengsel. Asfalmengsels met een fijnere korrelgradering (in de gebied van 0/5 tot 0/8) hebben een fijnere textuur. Door te spelen met de fijne fractie (en de mastiek samenstelling) kan het oppervlak nog verder worden geoptimaliseerd totdat MPD waarden van 0,5 worden gerealiseerd, wat naar verwachting correspondeert met een brandstofbesparing van ca. 3%.

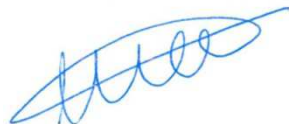
7 Referenties

- [1] EAPA (2004). *Environmental Impacts and Fuel Efficiency of Road Pavements*
- [2] <http://transport.michelin.com.au/Home/Value-added-Services/Fuel-Saving>
- [3] Bendtsen, H. *Silvia Project Report, Rolling resistance, Fuel consumption and Emissions: A literature Review.*
- [4] ISO 28580:2009 Passenger car, truck and bus tyres — Methods of measuring rolling resistance — Single point test and correlation of measurement results
- [5] Haaster, A.K. van (2011). *The energy saving potential of national road pavements by reducing rolling resistance*, Delft
- [6] Santero, N.J, Horvath, A. *Global Warming Potential of Pavements*, Berkeley
- [7] Platform for Aerodynamic Road Transport
'<http://www.part20.eu/nl/achtergrond/brandstofverbruik/>'
- [8] Benbow, E. et al.(2007). *Investigation of the Effects of Pavement Stiffness on fuel consumption*, TRL limited
- [9] Groenendijk, J. Berg, N. van den (2012). *Vlak is duurzaam*, artikel uit Asphalt nr.1
- [10] ISO 13473-2:2002, Characterization of pavement texture by use of surface profiles -- Part 2: Terminology and basic requirements related to pavement texture profile analysis.
- [11] Gurp, C.A.P.M. van, et. al. (2010). *Asfalt in de weg- en waterbouw*, CROW Ede
- [12] Amos, D. (2006). *Pavement Smoothness and Fuel Efficiency: An analysis of the Economic Dimensions of the Missouri Smooth Road Initiative*, Missouri
- [13] Sandberg, U. et al. (2011). Road Surface influence on tyre/road rolling resistance, Linköping
- [14] Zaragoza, A. (2011). *Concrete Pavements contribute to decarbonizing of transport*, EUROPAVE Brussels.
- [15] Mehdi Akbarian, Franz-Josef Ulm, *Model Based Pavement-Vehicle Interaction Simulation for Life Cycle Assessment of Pavements*, MIT, 2012.
- [16] Lopez Arteaga, I. (2010). *Band-wegdek interactie: stil, schoon, zuinig?*, 7^e SilentRoads Symposium, 18 mei 2010
- [17] Hultqvist, B.A.. *Measurements of fuel consumption on an asphalt pavement and a concrete pavement in Sweden*, Sweden
- [18] Heider, M. (2012). *Models for estimating energy consumption and CO2 emissions due to rolling resistance*, Presentation at TRB 2012
- [19] B. Schmidt, *New pavement types reduce rolling resistance*, Routes-roads 2015 No 366
- [20] L.G.Andersen, J.K. Larsen, *Introducing functional data analysis to coast down modelling for rolling resistance estimation*, Society of Automotive Engineers 2015
- [21] L.G Andersen et al. "Rolling Resistance Measurement and Model Development." J. Transp. Eng., (2014).
- [22] K Chatti & I. Zaabar, "Estimating the effects of pavement condition on vehicle operating costs", NCHRP report 720, Washington DC, 2012
- [23] Lenngren, C.A. Fäldner, L. (2010). *Fuel Cost considerations regarding truck rolling resistance on different pavement types*, paper 11th international symposium on concrete roads, Sevilla.
- [24] Milachowski, C. et al. *Life cycle assessment for road construction an use*, TU München

- [25] <http://web.mit.edu/newsoffice/2012/pavement-savings-tires-0523.html>
- [26] O. Chupin et al. "Evaluation of the structure-induced rolling resistance (SRR) for pavements including viscoelastic material layers", *Materials and structures* (2013) 46:683-696
- [27] J.Hoogwerff et. Al, *Influence of road surface type on rolling resistance*, Results of the measurements 2013
- [28] M. Pettinari et al. *New surface layers with low rolling resistance tested in Denmark, Asphalt Pavements*. Taylor & Francis, 2014. p. 323-332.
- [29] M. Pettinari, B.Schmidt, *Study of the influence of texture depth and longitudinal profile on rolling resistance properties of a test section in Denmark*, TRB 2016 Annual meeting
- [30] Coeee – novel pavements. Pre-study of mix design of green asphalt 6 – results of tests performed by Vejdirektoratet
- [31] C. Giezen, G.A. Leegwater, *Literatuur onderzoek-Brandstofverbruik in relatie tot wegdekken karakteristieken*, TNO 2012 R10528

8 Ondertekening

Delft, 31 maart 2016

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke at the end.

P. Pipilikaki
Auteur

A handwritten signature in blue ink, featuring a large, stylized 'S' and 'M' followed by a long horizontal line.

S.D. Mookhoek
Tweede lezer

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'E. Hagen' with a stylized flourish.

Ir. E. Hagen
Research manager a.i.
Structural Reliability