



Rapport

Opschaling onderzoek rolweerstand naar netwerkniveau

Colofon

Opdrachtnemer M+P raadgevende ingenieurs BV

Opdrachtgever Provincie Gelderland
Afdeling Beheer en Onderhoud Wegen
Postbus 9090
6800 GX Arnhem

Ordernummer 134090

Zaaknummer 2013-017098

Titel Opschaling onderzoek rolweerstand naar netwerkniveau

Rapportnummer M+P.PWG.13.04.2

Revisie 3

Datum 7 juli 2014

Aantal pagina's 45

Auteurs ir. J. Hooghwerff
ing. E.S.A.W. van Gils
ir. H.F. Reinink

Contactpersoon ir. Jan Hooghwerff | 073-6589050 | vught@mp.nl

M+P Wolfskamerweg 47 Vught | Postbus 2094, 5260 CB Vught
Visserstraat 50 Aalsmeer | Postbus 344, 1430 AH Aalsmeer

www.mp.nl | onderdeel van de Müller-BBM groep | Lid NLingenieurs | ISO 9001 gecertificeerd

Copyright © M+P raadgevende ingenieurs BV | Niets van deze rapportage mag worden gebruikt voor andere doeleinden dan is overeengekomen tussen de opdrachtgever en M+P (DNR 2011 Artikel 46).

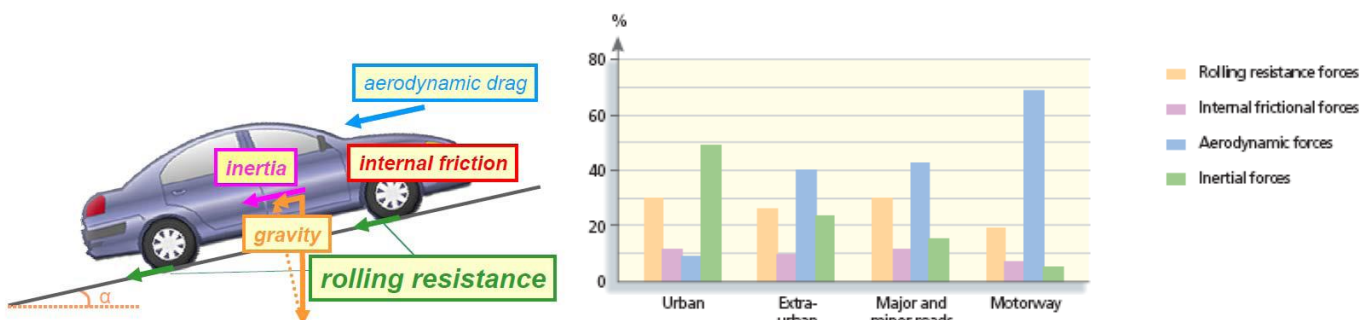
Management samenvatting

Duurzaam wegdekbeleid

Het vervoer van personen en goederen vraagt veel energie en levert daarmee veel CO₂-uitstoot. De provincie Gelderland vindt het belangrijk om in te zetten op duurzame mobiliteit. Naast het schoner worden van voertuigen door betere motoren, duurzame brandstoffen en banden met lage rolweerstand, kan ook CO₂-besparing worden gerealiseerd met een duurzaam wegdekbeleid. Circa 95% van de CO₂-uitstoot van het wegverkeer wordt veroorzaakt door het verkeer zelf. De overige 5% van de emissie is een gevolg van aanleg, beheer en onderhoud van de infrastructuur. Het grootste reductiepotentieel ligt dus bij de uitstoot van het verkeer. Voor de provincie, als beheerder van de weg, zijn er beperkt mogelijkheden om de emissie van het verkeer te beïnvloeden. De belangrijkste is de keuze van een wegdektype met een lage rolweerstand. Door de gemiddelde rolweerstand van het wegdek te verminderen, kan brandstof worden bespaard en daarmee CO₂-emissie gereduceerd.

Rolweerstand

Een voertuig (zie figuur links) ondervindt verschillende weerstandskrachten. De rolweerstand is de mechanische energie die omgezet wordt in warmte als een band zich over een bepaalde afstand over het wegdek verplaatst. Het aandeel van de rolweerstand in de som van de weerstandskrachten is voor verschillende rijomstandigheden anders: voor provinciale wegen circa 30%.



Rolweerstandsmetingen

In 2013 is door provincie Gelderland in samenwerking met Rijkswaterstaat een onderzoek uitgevoerd om inzicht te krijgen in het effect van het wegdektype op de rolweerstand. Op een groot aantal wegvakken zijn door M+P en TU Gdansk gelijktijdig rolweerstand- en textuurmetingen uitgevoerd. De resultaten laten verschillen zien in rolweerstand tussen wegdektypen tot circa 30%. Deze verschillen worden vooral bepaald door de gradering van het wegdek. Voor de meest gangbare wegdektypen op provinciale wegen kan gewerkt worden met een driedeling: de laagste rolweerstand hebben wegdektypen zoals dunne geluidreducerende deklaag (DGAD), dicht asfaltbeton en SMA8-varianten, in een volgende categorie zit bijvoorbeeld SMA11 en de categorie met de hoogste rolweerstandswaarden bevat ZOAB16 en oppervlaktbewerkingen.

Model

Het onderzoek in 2013 heeft een model opgeleverd waarmee op basis van textuurmetingen een betrouwbare schatting gemaakt kan worden van de rolweerstand. Textuurmetingen worden in de provincie al tweemaal uitgevoerd. Op basis van deze metingen is in dit onderzoek een aantal scenario's bekeken om inzicht te krijgen in het effect van wegdekbeleid op CO₂-emissie. De totale jaarlijkse CO₂-emissie van het verkeer in provincie Gelderland wordt geschat op 580 kton voor personenauto's en 350 kton voor vrachtwagens. De CO₂-footprint voor aanleg, beheer en onderhoud van wegen is circa 30 kton per jaar.

Effect wegdekkeuze

De eerste bevinding is dat de keuze in het verleden (circa 2003) voor wegdektypen met een fijne gradering voor de emissie van personenauto's een besparing van 2 tot 6 kton per jaar op een totaal van 580 kton/jaar heeft opgeleverd. Dit is equivalent aan een brandstofbesparing voor alleen personenauto's van 1 à 2 miljoen liter per jaar. Daarmee is de belangrijkste besparing via de keuze van wegdektype al gerealiseerd. Voor vrachtwagens is het effect (nog) niet onderzocht, de verwachting is dat ook voor vrachtwagens er een positief effect optreedt.

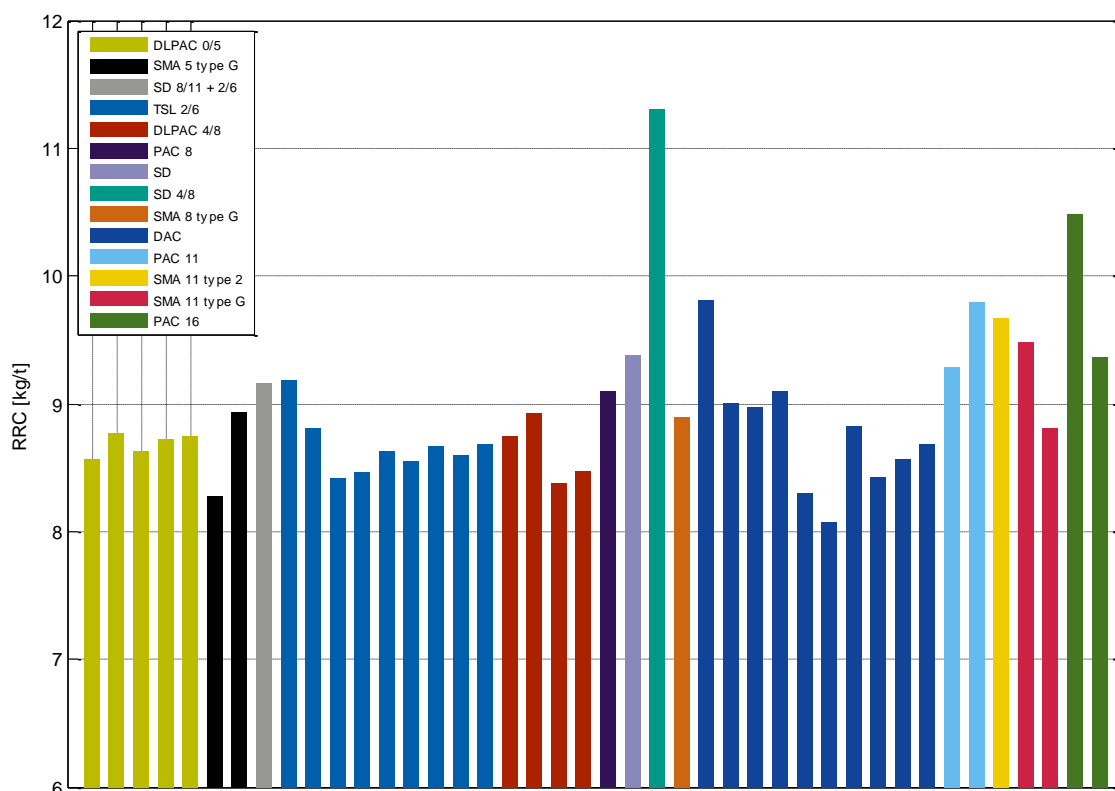
De voor de toekomst nog te realiseren reducties zijn beperkt. Een besparing van circa 3 kton per jaar is mogelijk als aanvullend een derde van het wegennet voorzien wordt van wegdektypen met een lage rolweerstand (DGAD of DAB). Deze keuze voor DGAD levert behalve veel geluidreductie, ook de laagste CO₂-emissie op. Daarnaast heeft het een gunstig effect op de NO_x en fijnstof emissie en daarmee ook op de stikstofdepositie in de natuur.

In de resultaten van dit onderzoek is het effect van verkeersgroei en het schoner worden van voertuigen niet verwerkt. Beide ontwikkelingen zorgen voor significante beïnvloeding van de totale verkeersemissies maar heffen elkaar naar verwachting grotendeels op.

Technische samenvatting

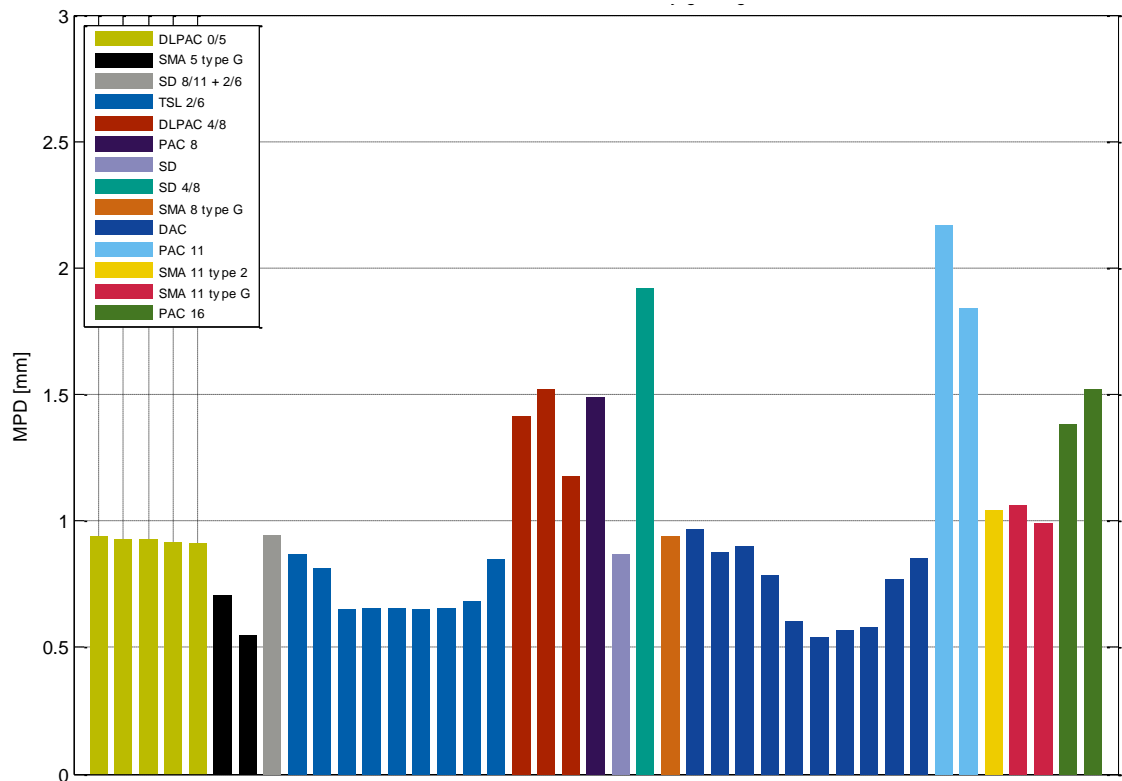
Vanuit het belang van brandstof- en CO₂-reductie is in 2013 een onderzoek uitgevoerd om het effect van verschillen tussen wegdektypen op de variatie in rolweerstand in kaart te brengen voor zowel het hoofdwegennet (autosnelwegen) als andere doorgaande (provinciale) wegen. Het meetprogramma bestond uit onderzoek op in totaal 69 wegvakken, waarvan gelijktijdig de rolweerstand en de textuur gemeten is. De geselecteerde vakken varieerden zowel in wegdektype als in leeftijd (en onderhoudstoestand). De meetcampagne is uitgevoerd in april 2013, in een samenwerking van M+P en TU-Gdansk.

In figuur 1 zijn de rolweerstandswaarden per wegvak weergegeven. Het betreft alle wegvakken die in de provincie Gelderland zijn gemeten in het kader van het meetprogramma “*Influence of road surface type on rolling resistance*”. De verschillende wegdektypen zijn met kleur aangegeven. De meetresultaten laten verschillen zien in rolweerstand tussen de verschillende wegdektypen tot circa 30%. Er zijn geen significante verschillen gevonden die te herleiden zijn tot verschillen in de leeftijd van het wegvak.



figuur 1 Rolweerstandswaarden van alle wegvakken die in provincie Gelderland zijn gemeten. De waarden zijn gecorrigeerd voor bandtemperatuur om de resultaten onderling te kunnen vergelijken

Naast rolweerstandmetingen zijn er gelijktijdig textuurmetingen uitgevoerd. De resultaten van de textuurmetingen worden uitgedrukt in de parameters MPD (“mean profile depth”), RMS (“root mean square”) en skewness (“scheefheid”). De MPD-waarden per wegvak zijn weergegeven in figuur 2.

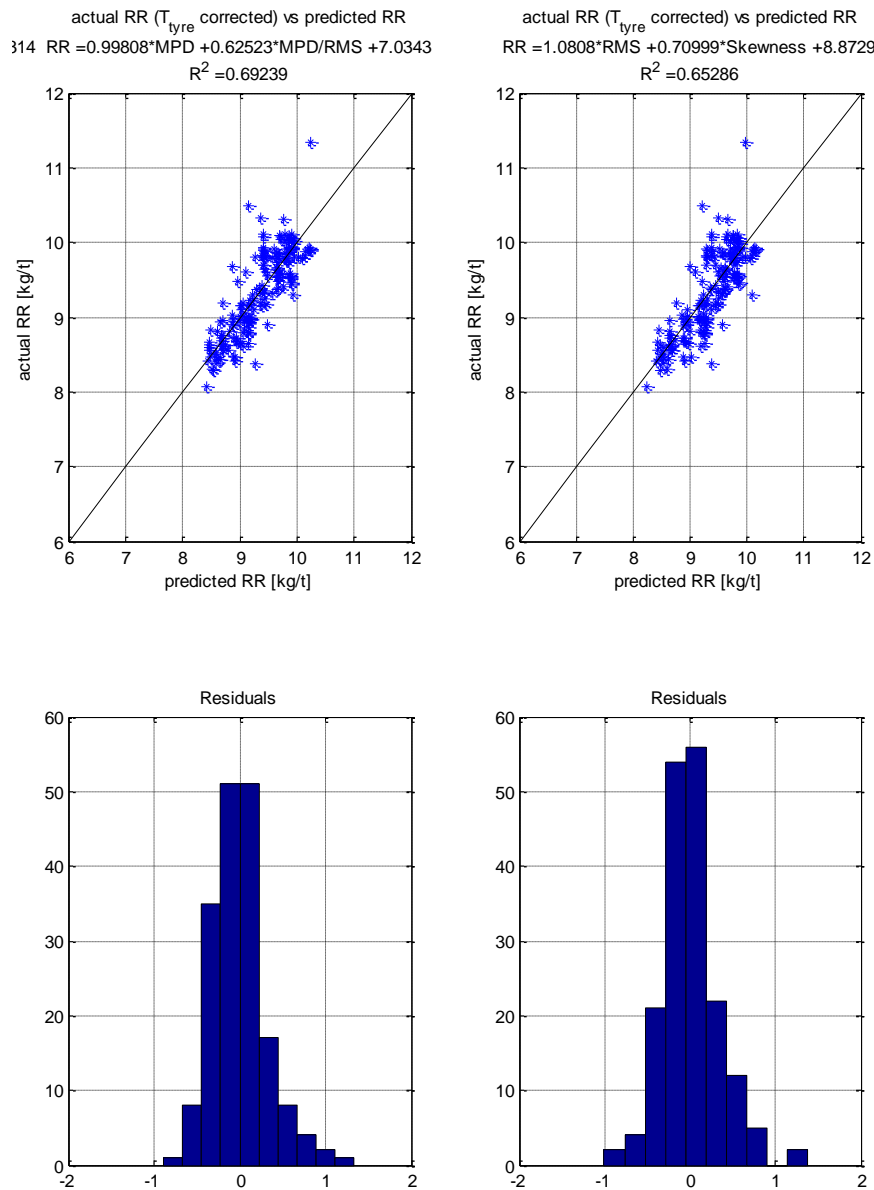


figuur 2

Textuur (MPD) waarden van alle wegvakken die in provincie Gelderland zijn gemeten in het kader van het meetprogramma rolweerstand [1]

Voor provinciale wegen betekent dit dat wegdektypen met een gradering van 0/11 (SMA en ZOAB) een circa $7 \pm 5\%$ hogere rolweerstand hebben in vergelijking met dunne dekklagen of dicht asfaltbeton.

Met behulp van de rolweerstand en textuur meetdata was een aantal regressiemodellen onderzocht. Voor deze regressiemodellen was gebruik gemaakt van alle meetdata die beschikbaar was binnen het onderzoek rolweerstand. Met dit model kan de rolweerstand bepaald worden op basis van één of meer textuurparameters (zoals MPD, RMS, skewness). Met de beste modellen kan de rolweerstand bepaald worden met een modelonzekerheid van $\pm 3\%$. In figuur 3 zijn enkele multi regressiemodellen weergegeven. Op de y-as staan de (werkelijke) rolweerstandswaarden en op de x-as de voorspelde rolweerstandswaarden die zijn berekend met het model. De R^2 -waarde (correlatiecoëfficiënt) en de spreiding van het residu zijn een maat voor de kwaliteit van de relatie.



figuur 3

De rolweerstand waarden uitgezet tegen de voorspelde waarden op basis van het multi regressie model $RR \sim MPD + MPD/RMS$ en $RR \sim RMS + Skewness$

Vervolgonderzoek verbetering relatie textuur en rolweerstand

Naar aanleiding van de positieve resultaten uit het onderzoek rolweerstand is een vervolgonderzoek uitgevoerd naar mogelijke optimalisatie van het textuur-rolweerstand-model. De belangrijkste bevinding was dat het bestaande textuur – rolweerstand model al behoorlijk robuust is. Het onderzoek heeft geleid tot de volgende relatie tussen textuur en rolweerstand:

$$(1) \quad RRC = (0.99 \pm 0.10) \cdot MPD + (0.48 \pm 0.20) \cdot \frac{MPD}{RMS} + (7.22 \pm 0.32) \quad (R^2 = 0,69)$$

Opschaling naar netwerkniveau

Ieder jaar worden in opdracht van provincie Gelderland wegdekmetingen uitgevoerd op 50% van haar areaal. Als onderdeel van deze wegdekmetingen worden textuurmetingen uitgevoerd. De resultaten van de textuurmetingen zijn in dit project gebruikt om de rolweerstand per 100 meter wegvaklengte te bepalen.

Dit onderzoek levert de inzichten uit het opschalen van het rolweerstandsonderzoek naar het gehele netwerk van provincie Gelderland.

- Een overzicht van de rolweerstand van het gehele wegennetwerk.
- Inzicht in verschillen in CO₂-emissie van het verkeer.
- Inzicht in CO₂-emissie-effecten voor interessante scenario's, vanuit ontwikkelingen van de afgelopen jaren en verwachtingen voor de komende jaren met betrekking tot wegdekbeleid en verkeersintensiteiten, waardoor een voor de CO₂-emissie optimale keuze gemaakt kan worden.

In totaal zijn er zes scenario's doorgerekend, waarbij op een kaart de CO₂-effecten op 100 meter vakken in detail zichtbaar zijn gemaakt. Als uitgangspunt is hierbij steeds de situatie 2012/2013 gebruikt. Bij de scenariostudies wordt steeds de rolweerstandscoefficiënt gevarieerd.

De CO₂-emissie in de uitgangssituatie (2013) ten gevolge van het verkeer wordt geschat op circa 580 kton voor personenauto's en 350 kton voor vrachtwagens. De 'eigen' CO₂-footprint van provincie Gelderland bedraagt circa 48 kton, waarvan circa 30 kton voor aanleg en beheer van asfaltverhardingen.

De volgende drie scenario's zijn doorgerekend, waarbij de CO₂-effecten van mogelijke in het verleden te maken wegdekkeuzes in kaart zijn gebracht:

- 100% SMA 11
- 40% SMA 11 en 60% DAB 16
- 100% ZOAB 16 (RWS scenario).

Deze scenario's betreffen keuzes die in het verleden gemaakt hadden kunnen worden. Het effect is alleen bepaald voor personenauto's. Als in het verleden één van deze keuzes gemaakt zou zijn, zou dat tot 3% hogere CO₂-emissie ten opzichte van de huidige situatie geleid hebben (tot circa 17 kton).

Daarnaast is het effect van drie mogelijke toekomstscenario's op de CO₂-uitstoot voor personenauto's bepaald:

- 100% DGAD
- 2/3 SMA 8G+ en 1/3 DGAD
- 100% SMA 8G+

Een realistisch toekomstscenario is 2/3 SMA 8G+ en 1/3 DGAD. Hiermee wordt een CO₂-besparing van circa 0,2% op jaarbasis gerealiseerd, ten opzichte van de uitgangssituatie. De absolute besparing is circa 1 kton per jaar.

Het effect voor vrachtwagens is niet (kwantitatief) onderzocht. De verwachting is dat het effect ligt tussen nihil en een (procentueel) vergelijkbaar effect als voor personenauto's.

Om inzicht te krijgen in het effect van verkeersgroei op de CO₂-uitstoot is met de verkeersprognose voor 2022 de verwachte toename van de CO₂-emissie bepaald. Uitgaande van een autonome groei van 1% per jaar vanaf 2012 tot 2022, stijgt de CO₂-emissie met circa 62 kton. Het betreft een stijging van 10,5%. De kanttkening bij deze stijging is dat door het schoner worden van het verkeer ook een reductie in deze orde grootte wordt verwacht.

Effect op luchtemissies

De gemaakte keuze om geluid en rolweerstand te reduceren met DGAD's heeft naast een afname van de CO₂-uitstoot ook een gunstig effect op de NO_x en fijnstof emissie en daarmee ook op de stikstofdepositie in de natuur. Geconcludeerd kan worden dat ten gevolge van het huidige wegdekbeleid (ten opzichte van de situatie in 2003) er sprake is van een reductie van de NO_x- en PM₁₀-emissie van 0,4 resp. 0,7%. Dit betreffen reducties uitgaande van de totale emissies voor lichte, middelzware en zware motorvoertuigen. Hierbij is geen rekening gehouden met de verkeersgroei.

Effect op brandstofverbruik

Een vermindering van de rolweerstand heeft een direct effect op het brandstofverbruik. Het totale brandstofverbruik voor personenwagens in 2003 – voor de invoering van dunne deklagen – was circa 1 à 2 miljoen liter per jaar hoger dan het verbruik in de uitgangsituatie 2012/2013.

Classificatiesysteem

Uit het onderzoek is duidelijk geworden dat de rolweerstand van wegdektypen te classificeren is aan de hand van de gradering van het wegdektype en de textuureigenschappen.

Op basis van de resultaten van [1] is een classificatie afgeleid voor de textuur- en rolweerstandswaarden van verschillende wegdektypen waardoor het mogelijk is om een (globale) klassenindeling te maken voor beleids- en beheerdoeleinden. De in de tabel opgenomen klassenindeling is gebaseerd op de eigenschappen van wegdektypen in nieuwstaat.

tabel 1

Classificatie van wegdektypen op basis van MPD en rolweerstandscoefficiënt

Klasse	Wegdektype (in nieuwstaat)	MPD-waarde [mm]	Rolweerstandscoefficiënt [kg/t]
A	DAB / DGAD / SMA8 / Tweelaags ZOAB	< 1,2	< 9,0
B	ZOAB11 / SMA11	1,2 - 1,6	9,0 - 9,5
C	ZOAB16 / oppervlakbehandeling	> 1,6	> 9,5

Inhoud

	Management samenvatting	3
	Technische samenvatting	5
1	Inleiding	11
1.1	Achtergrond	11
1.2	Doel	11
1.3	Leeswijzer	12
2	Data-inventarisatie en GIS-model	13
2.1	Beschikbare gegevens	13
2.2	Koppeling van databestanden	13
2.3	Inventarisatie textuurgegevens	14
3	Data-analyse	15
3.1	Vergelijk textuurdata 2012 met onderzoek rolweerstand	15
3.2	Vergelijk textuurdata 2012 en 2013	18
3.3	Correlatie textuur, verkeersintensiteit en leeftijd	19
3.4	Uitgangssituatie rolweerstand 2012/2013	21
4	Onderbouwing relatie rolweerstand en CO ₂ -emissie	23
4.1	Verband rolweerstand en CO ₂ -emissie	23
4.1.1	Personenwagens	23
4.1.2	Vrachtwagens	25
4.2	Uitgangssituatie CO ₂ -emissie personenwagens	25
4.3	CO ₂ -emissie vrachtwagens	27
5	Fijnstof en NO _x emissie	29
5.1	Gebruikte kentallen	29
5.2	Schattingen voor provincie Gelderland	30
5.3	Vergelijking met andere bronnen	31
6	Scenariostudies	32
6.1	Scenario's	32
6.2	Scenario 1: overall SMA 11	34
6.3	Scenario 2: 40 % SMA 11 en 60 % DAB 16	35
6.4	Scenario 3: overall ZOAB 16	36
6.5	Scenario 4: overall DGAD (of DAB)	37
6.6	Scenario 5: 2/3 SMA 8G+ en 1/3 DGAD	38
6.7	Scenario 6: overall SMA 8G+	39
6.8	Effecten van verkeersgroei	40
7	Overzicht resultaten en interpretatie	41
7.1	Overzicht resultaten	41
7.2	Vergelijk resultaat scenariostudies met carbon footprint	42
7.3	Classificatie wegdektypen voor rolweerstand	43
8	Conclusies	44

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In 2012 is de provincie Gelderland gestart met een onderzoek naar het bepalen van de verschillen in rolweerstand van diverse wegdektypen die in Gelderland worden toegepast. Een lagere rolweerstand betekent namelijk minder brandstofverbruik en dus uiteindelijk minder CO₂-emissie. Uit oriënterend onderzoek in 2011 was gebleken dat er een (duidelijk) verband is tussen de rolweerstand en de textuur van een wegdek. Aanvankelijk was het de bedoeling om op 25 wegvakken met verschillende wegdektypen mobiele textuurmetingen uit te voeren en op basis hiervan een afschatting te maken van de rolweerstand.

Bij Rijkswaterstaat (RWS-WVL) waren echter ook plannen om naar de rolweerstand van ZOAB-deklagen met verschillende steengrootte en verschillende leeftijden te kijken. Insteek van RWS-WVL was om ook daadwerkelijk rolweerstandsmetingen uit te voeren. Vanwege de gedeeltelijke overlap van beide onderzoeken en de te behalen synergievoordelen zijn beide onderzoeken in elkaar geschoven. Uiteindelijk zijn in het voorjaar van 2013 op circa 75 wegvakken (totale lengte circa 50 km), gelegen op autosnelwegen en provinciale wegen in Gelderland, gelijktijdig rolweerstands- en textuurmetingen uitgevoerd.

Aan de hand van deze meetdata is een model ontwikkeld waarmee de rolweerstand kan worden bepaald op basis van specifieke textuurparameters. In oktober 2013 zijn de resultaten van dit onderzoek inclusief het model opgeleverd [1]. Het model maakt het mogelijk om met (reeds beschikbare) textuurdata van het gehele wegennet, scenario-studies te doen naar het effect van (wegdek)ontwikkelingen op rolweerstand en CO₂-emissie van het verkeer (personenauto's).

1.2 Doel

De provincie Gelderland laat ieder jaar wegdekmetingen uitvoeren. Per jaar worden op 50% van het areaal textuurmetingen uitgevoerd. Insteek van deze metingen is het in kaart brengen van de onderhoudstoestand. Naast deze textuurgegevens zijn er onder andere ook gegevens beschikbaar van verkeersintensiteit, type deklagen en jaar van aanleg.

Dit project heeft de insteek om op basis van deze gegevens en de resultaten uit het onderzoek rolweerstand [1]:

- een overzicht te krijgen (met behulp van textuur-rolweerstandmodel) van de rolweerstand van het gehele wegennet van de provincie Gelderland.
- inzicht te krijgen in verschillen in CO₂-emissie ten gevolge van de hoeveelheid verkeer (personenauto's) op het provinciale wegennet.
- inzicht te krijgen in CO₂-emissie-effecten voor interessante scenario's, vanuit ontwikkelingen van de afgelopen jaren en verwachtingen voor de komende jaren met betrekking tot wegdekbeleid en verkeersintensiteiten.
- inzicht te krijgen in een voor provincie Gelderland optimale situatie vanuit het perspectief van (reductie van) rolweerstand / CO₂-emissie.

Omdat in 2013 behalve de metingen in provincie Gelderland en op rijkswegen ook metingen gedaan zijn op betonvakken, wordt tevens onderzocht of verbetering van het genoemde model mogelijk is. Dit onderzoek wordt (opnieuw) in samenwerking met Rijkswaterstaat gedaan.

1.3

Leeswijzer

In het volgende hoofdstuk wordt een inventarisatie gemaakt van de beschikbare data, waarna in hoofdstuk 3 een kort vergelijking wordt gemaakt met de gegevens uit het meetonderzoek rolweerstand. In hoofdstuk 4 wordt een onderbouwing gegeven voor de relatie tussen rolweerstand en CO₂-emissie. Hoofdstuk 5 geeft een indicatie voor de effecten op fijnstof en NO_x. Hoofdstuk 6 rekent een aantal scenario's door, waarna in hoofdstuk 7 de analyse en interpretatie wordt gedaan.

Voor het onderzoek (en het resultaat) naar een verbeterd textuur-rolweerstand-model is een afzonderlijke rapportage gemaakt: *Enhancements of texture vs rolling resistance model* [2].

2 Data-inventarisatie en GIS-model

2.1 Beschikbare gegevens

De provincie Gelderland laat jaarlijks textuurmetingen uitvoeren. Per jaar wordt steeds één rijrichting per wegvak gemeten. Uit de textuurdata kunnen de parameters MPD, RMS en Skewness worden bepaald. Naast textuurgegevens zijn nog diverse andere gegevensbronnen beschikbaar, waaronder: wegdektypen, jaar van aanleg en verkeersintensiteit.

In dit hoofdstuk wordt gekeken naar de beschikbare databestanden en wordt een eerste inventarisatie gemaakt van de textuurdata. De trend van de textuurdata wordt vergeleken met de data verkregen uit het onderzoek rolweerstand [1]. Daarnaast zal de rolweerstand worden berekend op basis van het multi regressie model uit dit onderzoek.

De gegevensbestanden die zijn gebruikt in de analyses zijn weergegeven in tabel II.

tabel II Beschikbare gegevensbronnen

bestandsnaam	bestandstype	relevante data
RMS MPD Skew data Provincie Gelderland 2012 (textuurdata van rechterrijsstroken)	Excel	<ul style="list-style-type: none"> ▪ wegnaam / km begin en km eind ▪ rijstrook ▪ MPD per rijspoor ▪ RMS per rijspoor ▪ Skewness per rijspoor
RMS MPD Skew data Provincie Gelderland 2013	Excel	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wegnaam / km begin en km eind ▪ Rijstrook ▪ MPD per rijspoor ▪ RMS per rijspoor ▪ Skewness per rijspoor
WVVPRO_1993_2013_GISIB	shape file	<ul style="list-style-type: none"> ▪ wegnaam / km begin en km eind ▪ type deklaag ▪ jaar van uitvoering
shapefile_samenstelling_verkeer_2012	shape file	<ul style="list-style-type: none"> ▪ wegnaam / km begin en km eind ▪ verkeersintensiteit lichte motorvoertuigen ▪ verkeersintensiteit middelzware motorvoertuigen ▪ verkeersintensiteit zware motorvoertuigen

2.2 Koppeling van databestanden

De bestanden worden met behulp van GIS gekoppeld. In het bestand met textuurgegevens is geen directe plaats informatie (RD-coördinaten) aanwezig. Daarom wordt het bestand via de route informatie (wegnaam en kilometrering) gekoppeld aan het WVVPRO-bestand.

Uit het WVVPRO-bestand wordt het type deklaag en jaar van uitvoering overgenomen.

2.3 Inventarisatie textuurgegevens

Op basis van de route informatie uit het WVVPRO-bestand is in figuur 4 een overzicht gegeven van de textuurdata uit 2013. Het textuur 2013 bestand is completer dan het textuur 2012 bestand.

De ontbrekende data is in het zwart aangegeven. Dit betreft circa 130 kilometer op het totaal van circa 1150 km weglengte. In 2013 is steeds de linkerrijbaan gemeten. Het textuur 2013 bestand is gekoppeld aan het WVVPRO-bestand. Vervolgens is per 100 meter wegvak uit het 2013 bestand, de 2012 data gekoppeld.

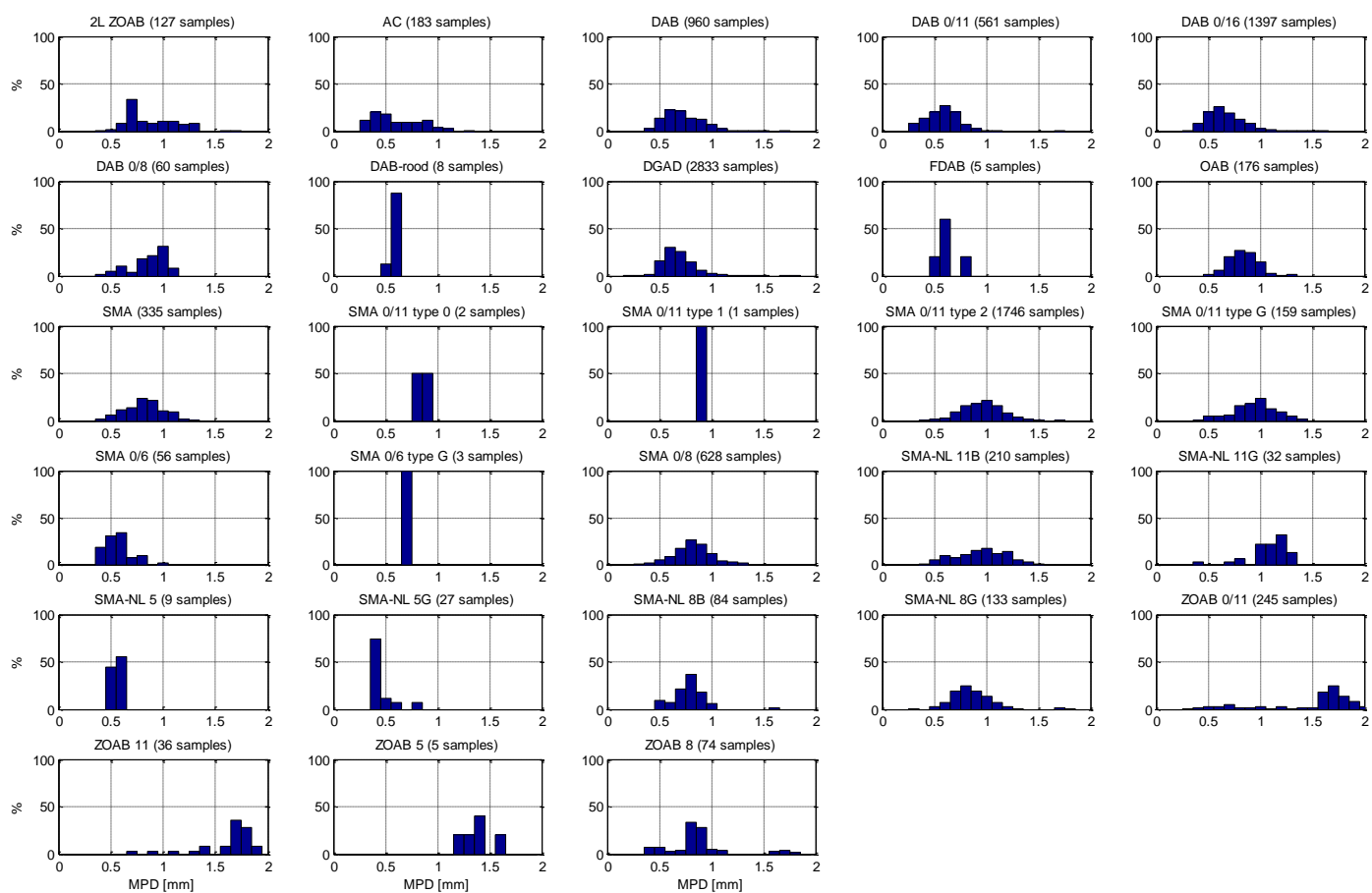


figuur 4 Beschikbare textuurdata uit 2013. In rood is aangegeven van welke wegvakken textuurdata beschikbaar is. In zwart de ontbrekende textuurdata in de 2013 dataset

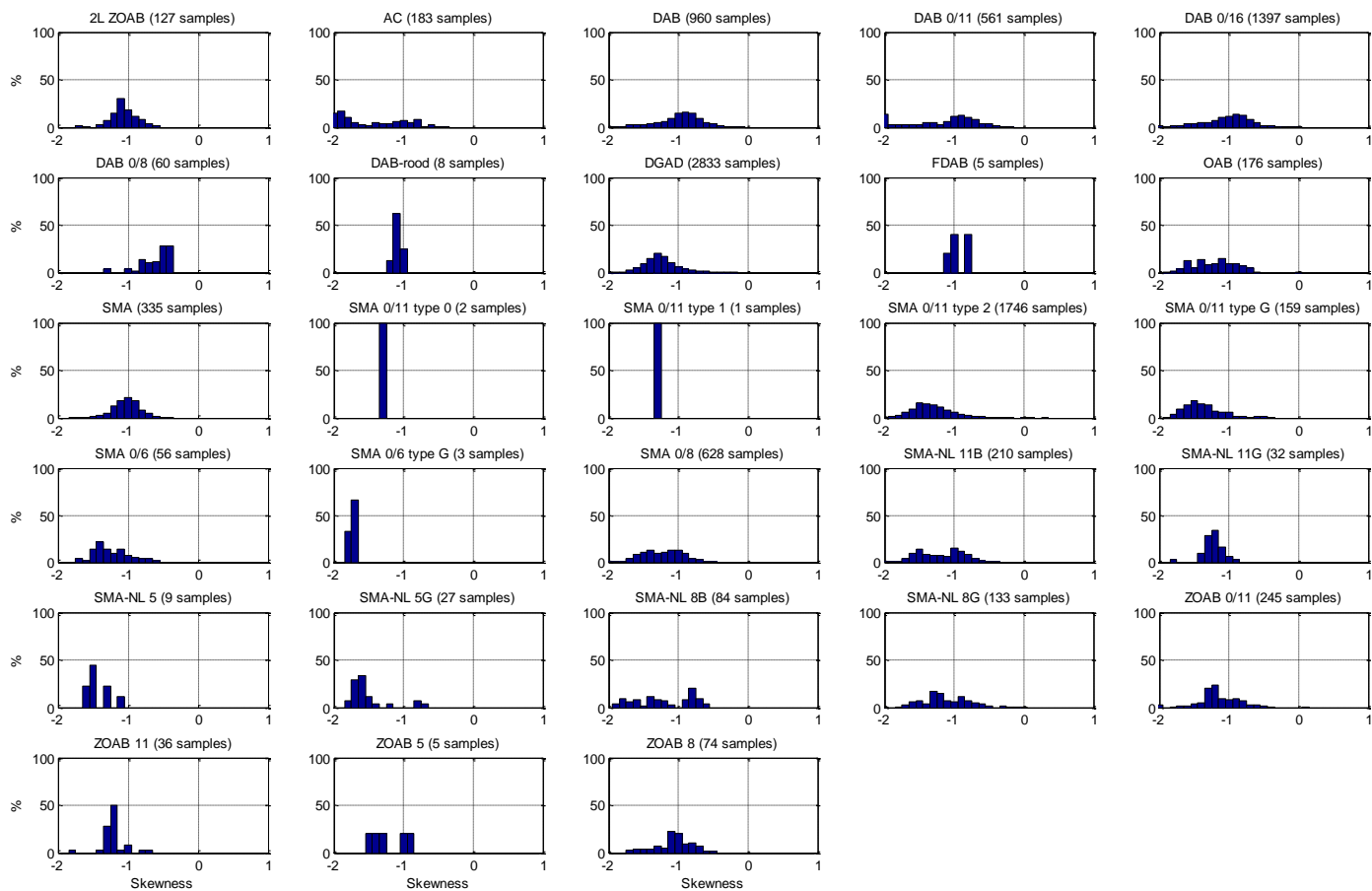
3 Data-analyse

3.1 Vergelijk textuurdata 2012 met onderzoek rolweerstand

In figuur 5 en figuur 6 is een analyse van de textuur data uit 2012 gemaakt. Per wegdektype is een histogram weergegeven van het percentage 100 meter vakken dat aan een bepaalde MPD of skewness waarde voldoet. Het betreft textuurwaarden in het rechterrijspoor.



figuur 5 *Histogrammen van de MPD-waarden per 100 m wegvaklengte in het rechterrijspoor per wegdektype (een 'sample' is een 100 meter wegvak)*



figuur 6 *Histogrammen van de Skewness-waarden per 100 m wegvaklengte in het rechterrijspoor per wegdektype*

Het volgende valt op naar aanleiding van deze figuren:

- vrijwel alle skewness-waarden (zie figuur 6) zijn negatief. In het onderzoek rolweerstand [1] was dit ook het geval;
- de verdeling van MPD-waarden (zie figuur 5) voor de verschillende wegdektypen is vergelijkbaar met de MPD-waarden die zijn gevonden in het onderzoek rolweerstand [1].

In tabel III is het bereik van de textuurparameters MPD, RMS en Skewness weergegeven voor de datasets onderzoek rolweerstand en het databestand textuur 2012.

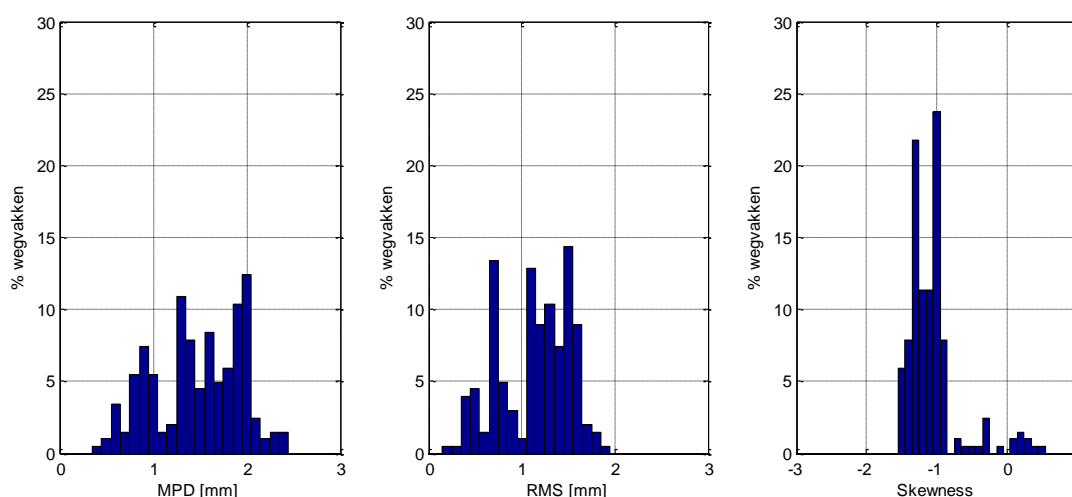
tabel III *Vergelijk van bereik MPD, RMS en Skewness waarden in de datasets onderzoek rolweerstand en het databestand textuur 2012*

	MPD		RMS		skewness	
	min	max	min	max	min	max
Onderzoek rolweerstand [1]	0,5	2,4	0,2	1,9	-1,5 ^{*)}	0,5
Textuur 2012 (100 m vakken)	0,2	2,6	0,1	2,0	-3,3 ^{*)}	0,3
Textuur 2012 (gem. per wegvak)	0,2	2,1	0,2	1,6	-2,6	0,1

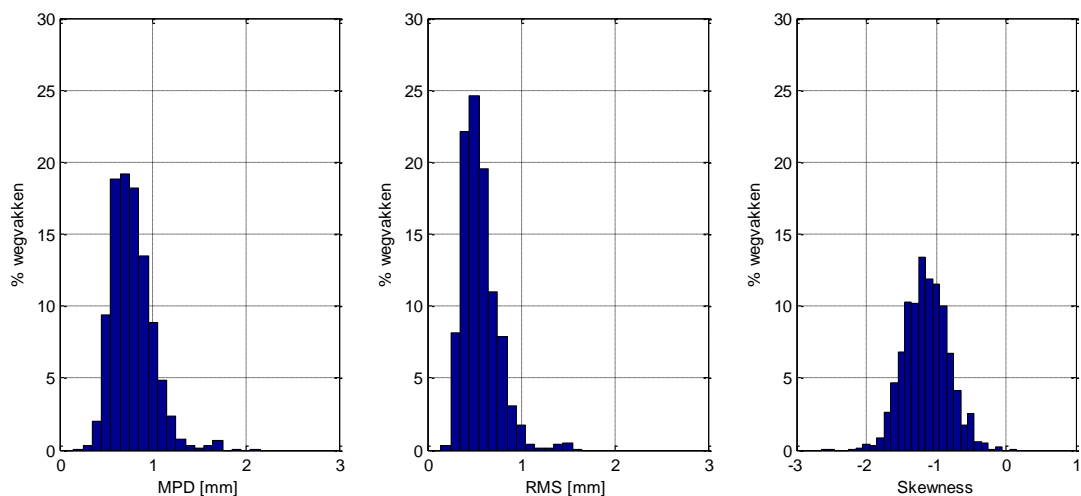
In tabel III vallen vooral de verschillen in Skewness-waarden op tussen het onderzoek rolweerstand en het textuur 2012 bestand. Deze verschillen worden mogelijk veroorzaakt door:

- Verschil in beoordelingslengte: bij het onderzoek rolweerstand wordt eerst per meter de Skewness bepaald. Vervolgens wordt voor de Skewness per 100 meter een middeling uitgevoerd over de onderliggende 1 meter vak data. In het textuur 2012 bestand wordt steeds per 100 meter de Skewness bepaald;
- Verschil in analysemethode: in het onderzoek rolweerstand wordt de Skewness bepaald volgens ISO 13473-2. In het textuur 2012 bestand wordt de statistische Skewness bepaald.

In het onderzoek rolweerstand [1] zijn de textuurwaarden per wegvak gemiddeld. Dezelfde werkwijze kunnen we ook volgen voor textuurdata uit het textuur 2012 bestand. Om te kunnen beoordelen of de relatie tussen rolweerstand en textuurwaarden uit het rolweerstand onderzoek ook toegepast kan worden op het textuur 2012 bestand, zijn in figuur 7 en figuur 8 de histogrammen van de textuurparameters MPD, RMS en skewness weergegeven.



figuur 7 *Histogram van MPD, RMS en skewness waarden (gemiddelden per wegvak) uit het onderzoek rolweerstand [1] (zowel provinciale als rijkswegen)*

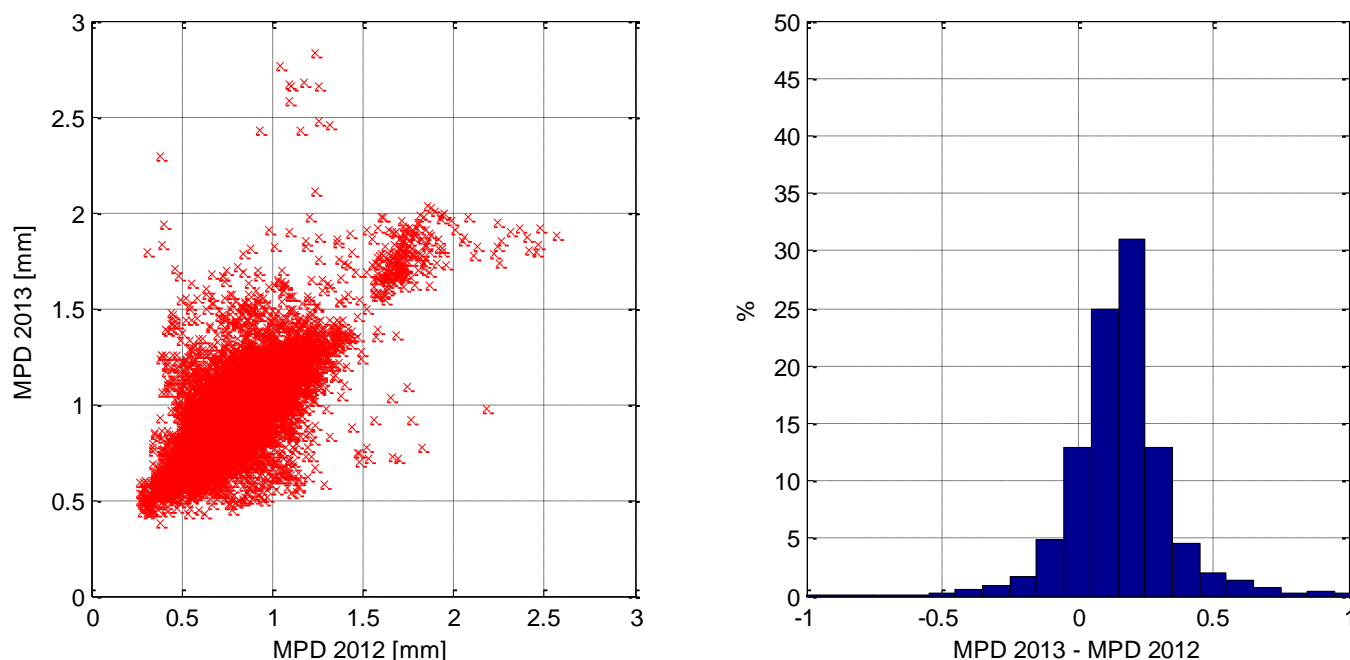


figuur 8 *Histogram van MPD, RMS en skewness waarden (gemiddelden per wegvak) uit textuur 2012 bestand*

Uit figuur 7 blijkt dat in het onderzoek rolweerstand een brede selectie van wegvakken is onderzocht met veel spreiding in MPD en RMS-waarden. Daarnaast blijkt dat de wegvakken overwegend een negatieve skewness waarde hebben tussen -1,5 en -1,0. Vergelijken we dit met figuur 8 dan vinden we overwegend MPD- en RMS-waarden onder 1,0 mm. De skewness-waarden zijn ongeveer normaal verdeeld met een gemiddelde van -1,0. De gevonden MPD, RMS en Skewness waarden vertonen voldoende overlap met de textuurwaarden die zijn gevonden in het onderzoek rolweerstand. De relatie die gevonden is in het onderzoek rolweerstand kan daarmee ook worden toegepast op de data uit het textuur 2012 bestand.

3.2 **Vergelijk textuurdata 2012 en 2013**

In figuur 9 is een vergelijk gemaakt van de MPD-waarden uit 2012 en 2013. Het betreft respectievelijk data van de rechterrijbaan en linkerrijbaan. In de linker figuur zijn de MPD-waarden per 100 meter wegvak in 2013 uitgezet tegen de MPD-waarden uit 2012.



figuur 9 Links correlatie van MPD-waarden uit 2012 en 2013. Rechts een histogram van de verschillen in MPD-waarden tussen de twee datasets

In figuur 9 valt op dat een behoorlijke spreiding in de resultaten optreedt. Mogelijke oorzaken hiervoor zijn:

- er zit een jaar verschil tussen de twee meetmomenten waartussen de wegvakeigenschappen zijn gewijzigd;
- de linkerrijbaan wordt vergeleken met de rechterrijbaan;
- mogelijk verschil in wegdektype tussen linker- en rechterrijbaan ten tijde van de metingen.

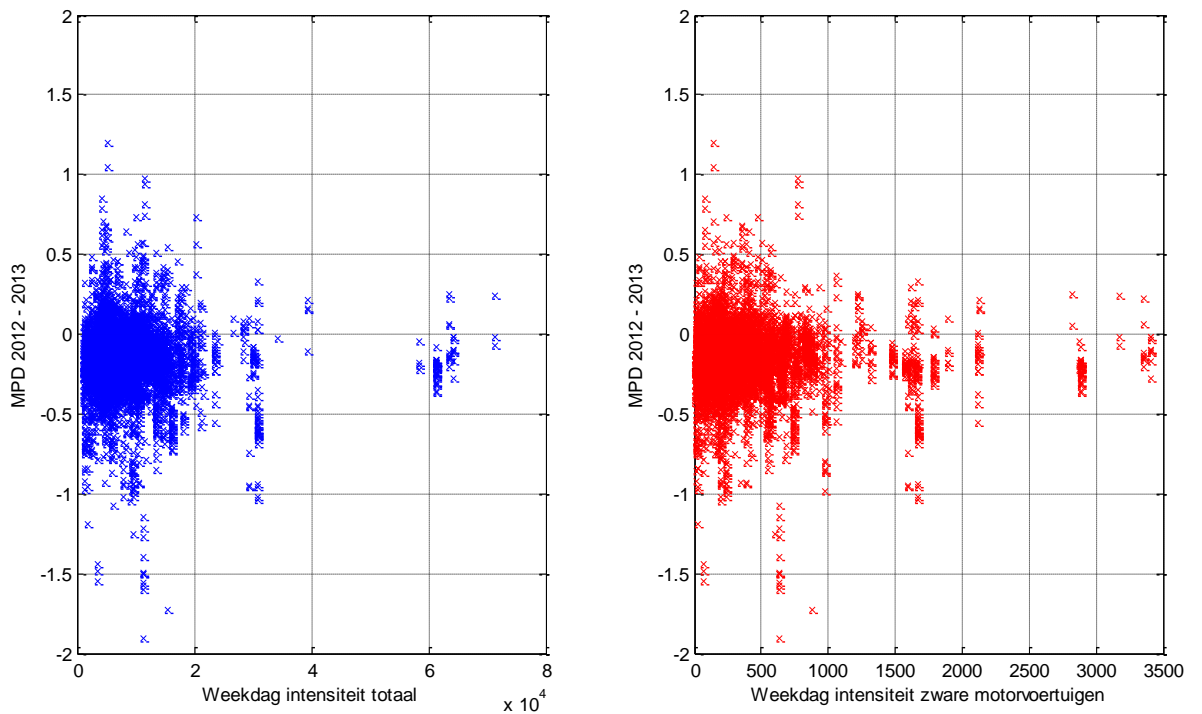
In de rechter figuur is per 100 meter vak het verschil in MPD-waarde uitgezet in een histogram. Het volgende valt op:

- er is een verschil van $0,2 \pm 0,5$ mm (95 % betrouwbaarheidsinterval) tussen de gemiddelde MPD-waarde van de 2012 en 2013 dataset;
- de verschillen zijn normaal verdeeld.

Omdat het verschil in gemiddelde MPD-waarde statistisch gezien niet significant is, wordt geconcludeerd dat zowel de 2012 als 2013 textuurdata bruikbaar zijn voor het onderzoek. Voor de bepaling van de rolweerstand wordt gebruik gemaakt van de verbeterde relatie tussen textuur en rolweerstand uit het rapport over de verbetering van de relatie [2].

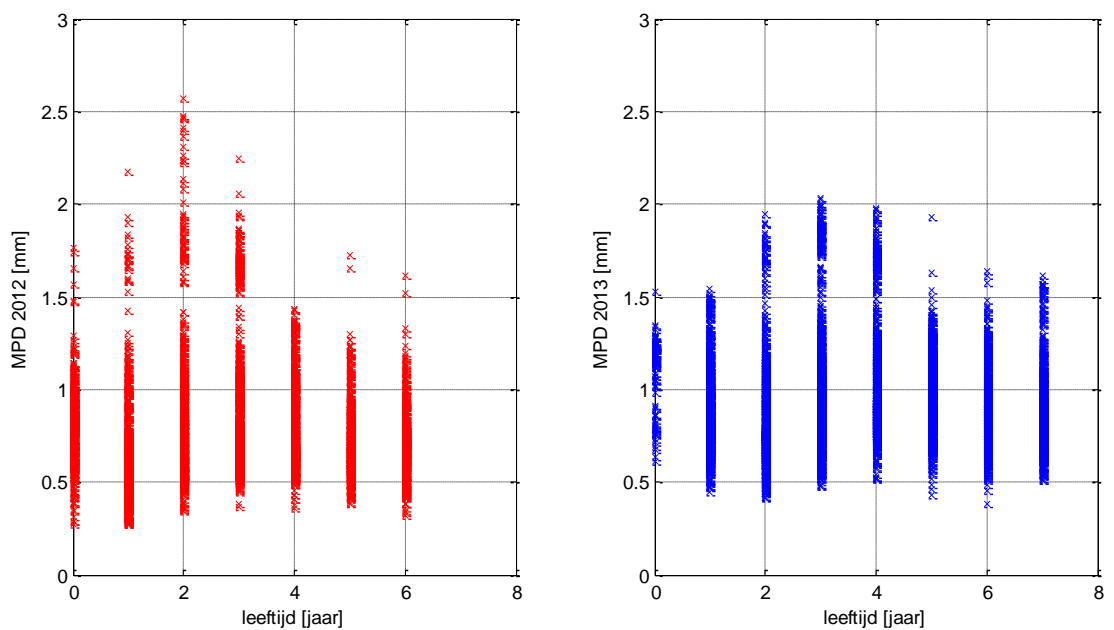
3.3 Correlatie textuur, verkeersintensiteit en leeftijd

In figuur 10 is een spreidingsdiagram weergegeven waarbij het verschil in MPD-waarden tussen 2012 en 2013 is uitgezet tegen de totale weekdagintensiteit of de weekdagintensiteit zware motorvoertuigen. Uit de figuur blijkt dat er geen duidelijke correlatie is tussen de parameters.



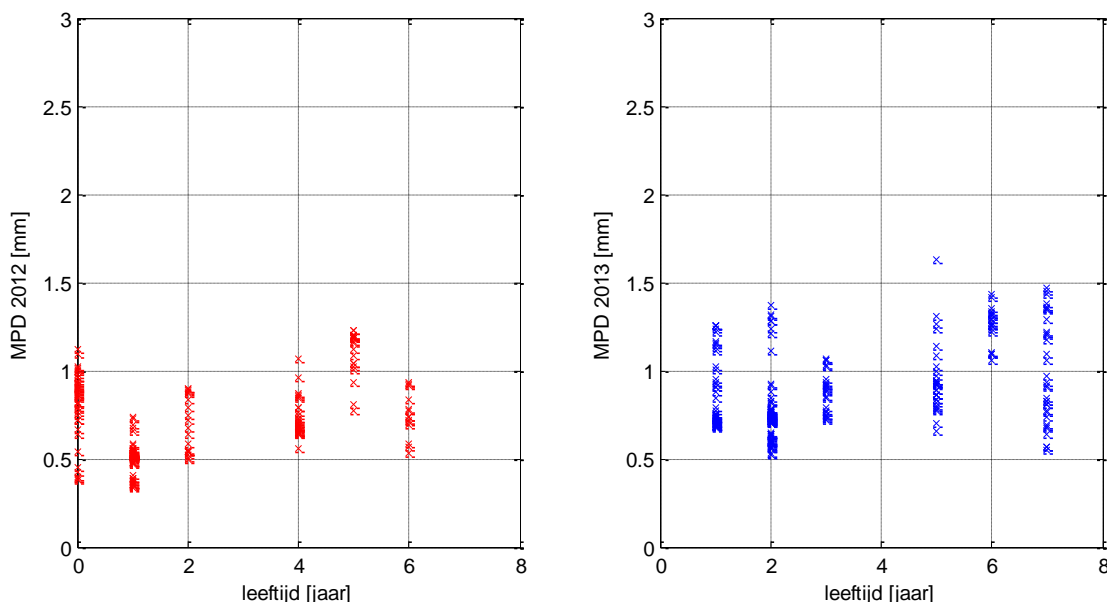
figuur 10 *Spreidingsdiagram verschil in MPD-waarden 2012 en 2013 versus weekdagintensiteit. Links: totale weekdagintensiteit, rechts: weekdagintensiteit zware motorvoertuigen*

In figuur 11 is het verband tussen MPD en leeftijd van het wegvak onderzocht, voor zowel de 2012 als 2013 dataset. In beide gevallen treedt een grote spreiding in MPD-waarden op. Er is geen verband tussen de gemeten MPD-waarde en leeftijd van het wegvak.



figuur 11 *Spreidingsdiagram MPD-waarden in 2012 (rood) en 2013 (blauw) versus leeftijd.*

In figuur 12 is de data uit figuur 11 gefilterd op percentage zware motorvoertuigen. De spreiding in MPD-waarden kan worden gereduceerd als alleen de wegvakken met 8% of meer zware motorvoertuigen worden meegenomen. De resultaten in figuur 12 zijn gebaseerd op 469 segmenten van 100 meter wegvaklengte. Ook in deze figuur is geen eenduidige trend zichtbaar.



figuur 12 *Spreidingsdiagram MPD-waarden in 2012 (rood) en 2013 (blauw) versus leeftijd. Alleen wegvakken met ten minste 8 % zware motorvoertuigen*

3.4 Uitgangssituatie rolweerstand 2012/2013

Iedere twee jaar worden in opdracht van provincie Gelderland textuurmetingen uitgevoerd op het gehele provinciale wegennet. Het ene jaar wordt de rechterraaijbaan gemeten, het andere jaar de linkerraijbaan. Uit deze textuurmetingen zijn de parameters MPD en RMS te bepalen. Met behulp van deze parameters kan de rolweerstand voor personenwagens per 100 meter vak worden berekend (zie formule (2)).

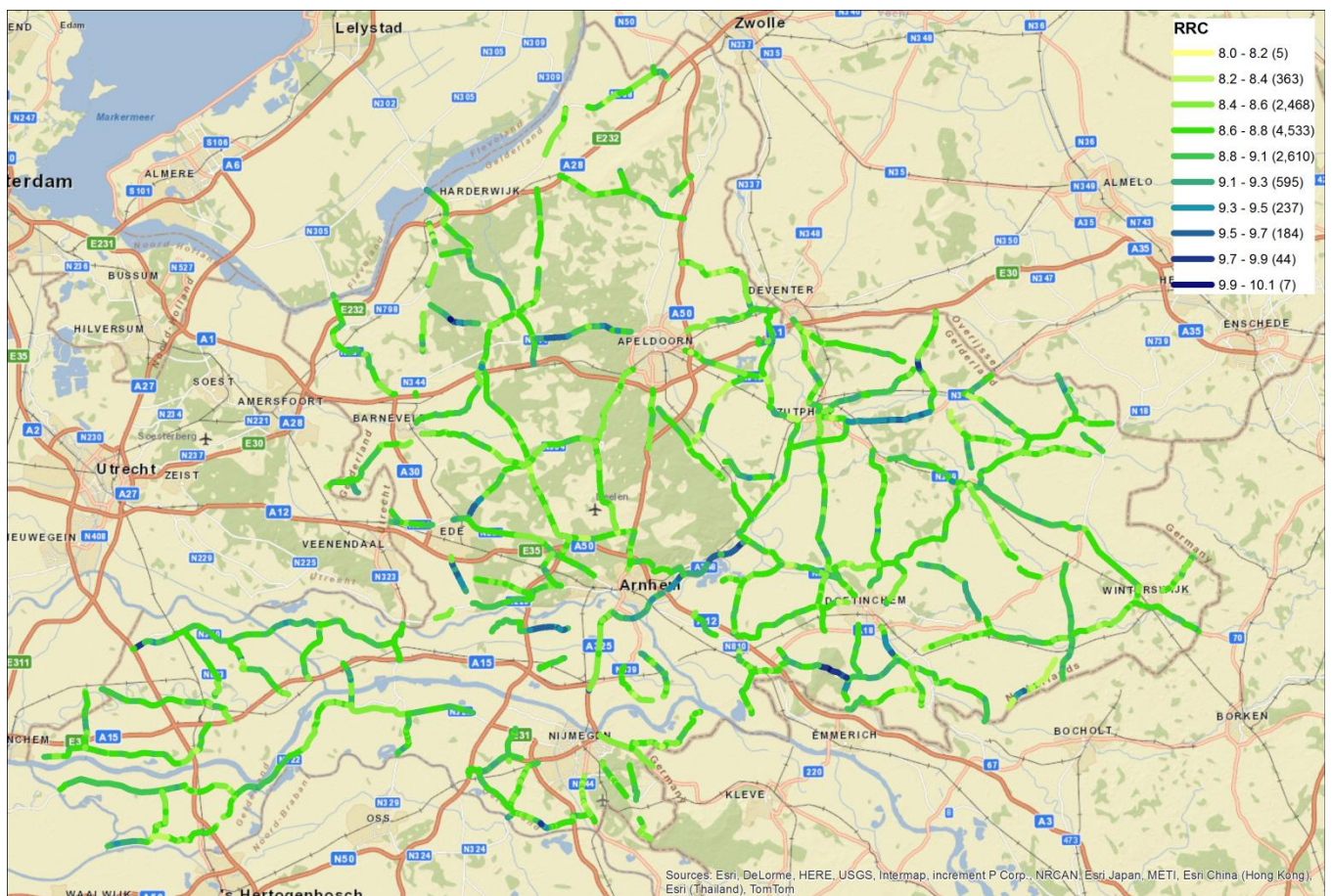
In de vorige paragraaf is gekeken naar de verdeling van MPD- en skewness-waarden. Omdat deze waarden vergelijkbaar zijn met de textuurgegevens in het onderzoek rolweerstand, kan met behulp van de multiregressie relatie de rolweerstand per 100 m vak worden berekend.

Het gebruikte textuur-rolweerstand-model is een (licht) verbeterde versie van het model uit [1]. In een afzonderlijk onderzoek (met Rijkswaterstaat) is nagegaan of optimalisatie van het textuur-rolweerstand-model mogelijk was. Ten eerste is onderzocht of het bestaande model representatief is, door het maken van een robuust model op basis van een evenwichtige selectie van meetresultaten van verschillende wegdektypen of op basis van verschillende Skewness waarden. Daarnaast is het effect van het toepassen van tyre enveloping en/of filtering van het ruwe textuursignaal onderzocht. De belangrijkste bevinding was dat het bestaande textuur – rolweerstand model al behoorlijk robuust is. Het uitvoeren van extra filtering of tyre enveloping heeft geen positief effect op de kwaliteit van de relatie. Het toevoegen van enkele extra metingen aan beton wegvakken maakt het model wel nauwkeuriger. De aanbeveling uit het rapport is om in vervolgonderzoeken de volgende relatie tussen textuur en rolweerstand te gebruiken:

$$(2) \quad RRC = (0.99 \pm 0.10) \cdot MPD + (0.48 \pm 0.20) \cdot \frac{MPD}{RMS} + (7.22 \pm 0.32) \quad R^2 = 0,69$$

De onderbouwing van deze verbeterde versie van de relatie is opgenomen in [2], de gegevens over de gebruikte metingen aan beton wegvakken in [12].

Het resultaat van deze berekening is in figuur 13 weergegeven op de kaart. Indien er voor een wegvak zowel textuurdata uit 2012 als 2013 beschikbaar is, wordt de rolweerstand per rijstrook bepaald en vervolgens gemiddeld per 100 meter vak.



figuur 13 Berekening van de rolweerstand voor het hele provinciale netwerk, gebaseerd op de textuurwaarden van 2012 en 2013 (uitgangssituatie)

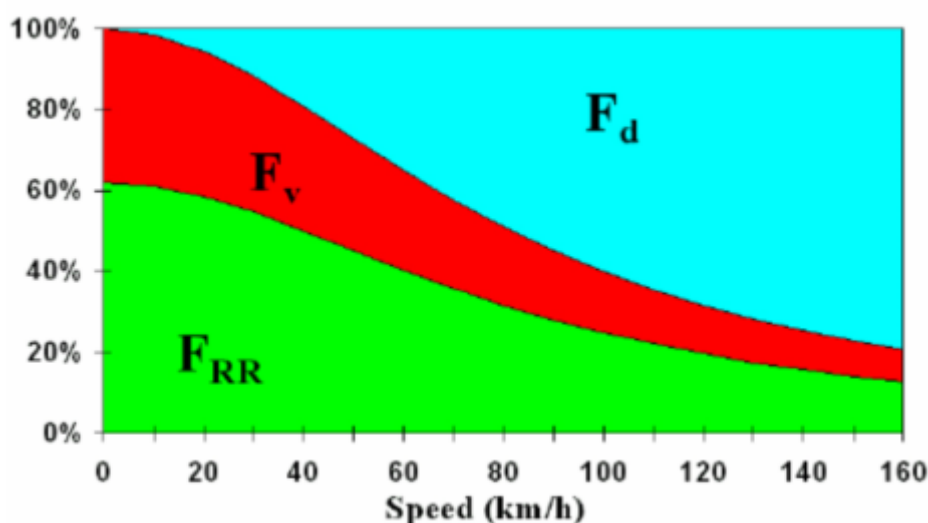
4 Onderbouwing relatie rolweerstand en CO₂-emissie

4.1 Verband rolweerstand en CO₂-emissie

In het vorige hoofdstuk is inzicht gegeven in de rolweerstand van het hele wegennet voor de situatie 2012/2013. Deze situatie noemen we in het onderzoek de uitgangssituatie. De variatie van de rolweerstand door verschil in wegdekeigenschappen leidt ook in variatie van de CO₂-emissie. In dit hoofdstuk wordt toegelicht welke relatie is gebruikt voor de omrekening van (variatie in) rolweerstand naar (variatie in) CO₂-emissie voor het provinciale wegennet.

4.1.1 Personenwagens

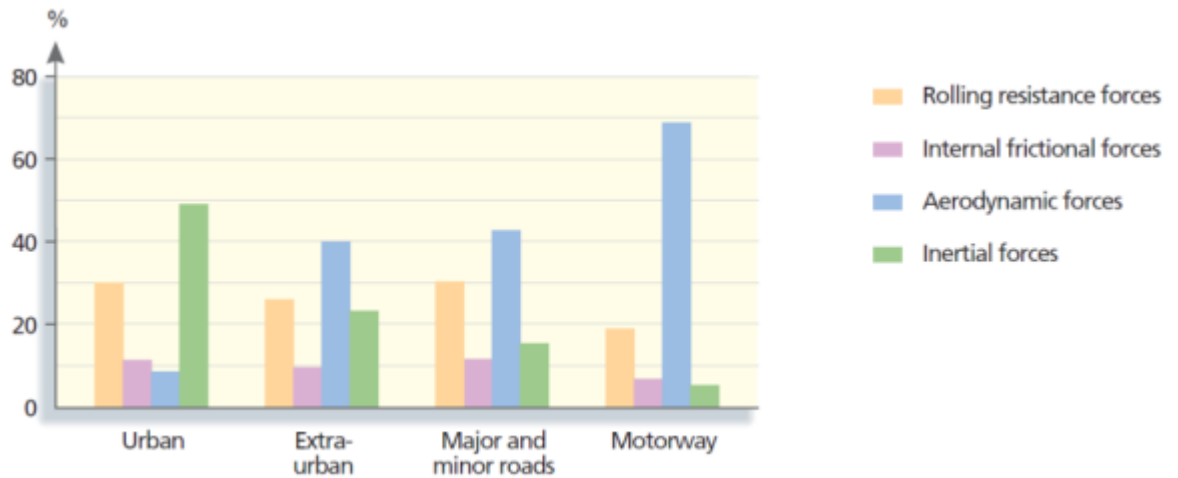
Van belang is om inzicht te hebben in het deel van het energiegebruik dat beïnvloed wordt door de rolweerstand van het wegdek. Het gaat hierbij alleen om de invloed van de textuur op de rolweerstand. Het effect van andere parameters, zoals de langsvlakheid en vervorming van het wegdek is voor de Nederlandse situatie significant kleiner dan die van de textuur. In figuur 14, afkomstig uit een Michelin publicatie [3], is de beschikbare mechanische energie aan de aandrijfas van een personenwagen uitgezet als functie van de voertuigsnelheid. Het betreft steeds een situatie bij een constante rijsnelheid.



figuur 14 *Energieverdeling van een personenwagen uitgezet tegen snelheid als een percentage van de aandrijfenergie [3]. F_d = luchtweerstand, F_v = interne wrijvingskrachten, F_{RR} = rolweerstand*

Uit de figuur blijkt dat rolweerstand ten minste 1/3 van de totale kracht is bij snelheden tot 70 km/h. Bij snelheden hoger dan 70 km/h is dit 1/4 of minder.

In een ander Michelin onderzoek [4] is de rolweerstand van personenwagenbanden gemeten als percentage van de totale weerstandskracht voor een viertal typische situaties: stedelijk, buiten stedelijk, hoofdwegen en snelwegen.



figuur 15 De bijdrage van rolweerstand in het brandstofverbruik van personenwagens [4]

Hierbij is uitgegaan van een personenwagen van 1100 kg en een rolweerstandscoefficiënt van 12 kg/t. Voor stedelijke situaties wordt ongeveer 30 % van het totale brandstofverbruik bepaald door de rolweerstand. Bij wegvakken met een maximumsnelheid van 80 km/h (“extra urban”, “major/minor roads”) is dit ook ongeveer 30 %.

Omdat de CO₂-uitstoot evenredig is met het brandstofverbruik kan voor de omrekening van rolweerstand naar CO₂-uitstoot gebruik worden gemaakt van deze factoren. Bedacht moet worden dat deze factoren het effect waarschijnlijk onderschatten, omdat bijvoorbeeld de ‘interne weerstandskrachten’ proportioneel zijn met de gevraagde mechanische energie. Dat betekent dat een verminderde rolweerstand direct leidt tot lager brandstofverbruik, maar dat ook andere interne weerstandskrachten (proportioneel) lager zijn.

Voor de provinciale situatie wordt onderscheid gemaakt tussen wegvakken met een maximumsnelheid van 70 km/h of lager, of 70 km/h en hoger. De verhouding tussen variatie in rolweerstand en effect daarvan op de CO₂-emissie die bij de berekeningen wordt aangehouden bedraagt respectievelijk 1/3 en 1/4.

4.1.2 Vrachtwagens

Het effect van het veranderen van de rolweerstand op de CO₂-emissie van vrachtwagens is van verschillende factoren afhankelijk. Het aandeel van de rolweerstand in de totale voertuigweerstand is sterk afhankelijk van het gewicht en inzetgebied en kan tussen de 30 en 60% bedragen.

De meeste verliezen die optreden zijn proportioneel aan de energiebehoefte. Met een reductie van de rolweerstand daalt de energiebehoefte. Daarmee worden andere verliezen echter ook kleiner.

Uit onderzoek [5] blijkt dat het aandeel van de rolweerstand in de totale wrijvingskracht circa 45% bedraagt bij 85 km/h (zie figuur 16). Voor vrachtwagens wordt uitgegaan van een factor 2, waarbij wordt aangenomen dat de helft van de interne wrijvingskrachten proportioneel zijn met de rolweerstandskracht.



figuur 16 Aandeel van verschillende wrijvingskrachten in het totale brandstofverbruik van een vrachtwagen bij 85 km/h [5]

4.2 Uitgangssituatie CO₂-emissie personenwagens

De gemiddelde CO₂-uitstoot van personenauto's per gereden kilometer was in 2012 volgens het CBS [6] [7] 177 g/km. Met dit gegeven en de verkeersintensiteit is per 100 meter wegvaklengte de *ongecorrigeerde* CO₂-emissie te berekenen. Hiervoor is gebruik gemaakt van de verkeerscijfers uit 2012, zie paragraaf 2.1. Met 'ongecorrigeerd' wordt bedoeld dat we geen rekening houden met variatie in de rolweerstand op de CO₂-emissie. We gaan er vanuit dat de gemiddelde CO₂-emissiefactoren gelden voor een 'gemiddeld' wegdektype.

De ongecorrigeerde jaarlijkse CO₂-uitstoot per 100 meter segment wordt als volgt bepaald:

$$(3) \quad CO_{2\text{segment, ongecorrigeerd}} = f_{lmv} \cdot I_{\text{weekdag}} \cdot 365 \cdot CO_{2\text{gemiddeld}} \cdot \text{segmentLengte}$$

Waarin f_{lmv} de fractie lichte motorvoertuigen, I_{weekdag} de weekdagintensiteit, $CO_{2\text{gemiddeld}}$ de gemiddelde CO₂-uitstoot van lichte motorvoertuigen in kg/m en segmentlengte de lengte van het wegsegment (meestal 100 meter).

Om differentiatie aan te kunnen brengen in de CO₂-uitstoot door veranderingen in rolweerstand, wordt eerst een representatieve gemiddelde rolweerstandscoëfficiënt bepaald voor het gehele Gelderse wegennet. Op basis van de metingen uit het bredere onderzoek rolweerstand [1] en een evenredige verdeling van intensiteiten over de wegdektypen DGAD, DAB en SMA 8 en 11 volgt een gemiddelde rolweerstandscoëfficiënt van 8,8 kg/t. De gemiddelde CO₂-uitstoot van een personenauto bij deze (gemiddelde) rolweerstandscoëfficiënt wordt gelijk gesteld aan 177 g/km.

De *gecorrigeerde* CO₂-uitstoot per segment wordt bepaald door gebruik te maken van de verhouding tussen rolweerstand en CO₂-uitstoot en het verschil in rolweerstand van het 100 m vak ten opzichte van de gemiddelde rolweerstandscoëfficiënt:

$$(4) \quad CO_{2\text{segment, gecorrigeerd}} = CO_{2\text{segment, ongecorrigeerd}} + \frac{RRC_{\text{segment}} - RRC_{\text{gemiddeld}}}{RRC_{\text{gemiddeld}}} \cdot RRC_{\text{factor}} \cdot CO_{2\text{segment, ongecorrigeerd}}$$

Waarbij:

- CO_{2,segment,gecorrigeerd}: de CO₂-uitstoot voor dit segment gecorrigeerd voor de werkelijke rolweerstandwaarde;
- CO_{2,segment,ongecorrigeerd}: de gemiddelde CO₂-uitstoot van een personenwagen voor dit segment;
- RRC_{segment}: de berekende rolweerstand voor dit segment, op basis van MPD en RMS-waarde;
- RRC_{gemiddeld}: de gemiddelde rolweerstandscoëfficiënt voor het Gelderse wegennet;
- RRC_{factor}: 1/3 voor wegvakken met een maximumsnelheid van 70 km/h of lager en 1/4 voor alle overige wegvakken.

In figuur 17 is de berekende CO₂-uitstoot per 100 meter wegvaklengte voor de uitgangssituatie 2012/2013 weergegeven. De totale jaarlijkse CO₂-uitstoot voor lichte motorvoertuigen bedraagt circa 579 kton per jaar.



figuur 17 De CO₂-uitstoot [ton] voor lichte motorvoertuigen voor het hele provinciale netwerk per 100m-vak, gebaseerd op de textuurwaarden van 2012 en 2013. De totale berekende CO₂-uitstoot voor lichte motorvoertuigen bedraagt 579 kton per jaar

4.3 CO₂-emissie vrachtwagens

In de scenariostudies wordt alleen gekeken naar effecten op de CO₂-emissie van personenwagens. Dit heeft enerzijds te maken met het feit dat er weinig onderzoeksgegevens over de relatie tussen rolweerstand en CO₂-emissie voor vrachtwagens zijn. Anderzijds is de intensiteit van vrachtwagens op het provinciale wegennet doorgaans relatief laag.

Op basis van meetgegevens uit een onderzoek naar de rolweerstand van een typische vrachtwagenband [10] wordt een verband verkregen tussen de MPD-waarden en de rolweerstand. Bij dit onderzoek zijn rolweerstand- en textuurmetingen uitgevoerd op negen verschillende wegdektypen, waaronder ZOAB 0/6 en DAB.

Het volgende verband wordt gevonden tussen de rolweerstand (f_{RW}) en MPD-waarden:

$$(5) \quad f_{RW} = 0,7436 \cdot MPD + 4,6278$$

Het is niet bekend in hoeverre dit verband representatief is voor een gemiddelde vrachtwagenband.

Uit cijfers van Stimular, SKAO en Connexx [11] blijkt dat de gemiddelde CO₂-uitstoot voor zware vrachtwagens 1010 g/km bedraagt.

Op basis van de textuurdata uit 2013 is de rolweerstand berekend volgens formule (4) en is de CO₂-uitstoot berekend op dezelfde manier als in paragraaf 4.2. De totale CO₂-uitstoot door vrachtwagens komt hiermee uit op circa 158 kton per jaar.

Als wordt verondersteld dat de textuur geen invloed heeft op de rolweerstand van een vrachtwagenband, dan wordt afgerond ook een totale uitstoot van 158,0 kton per jaar gevonden. Als we de invloed van textuur voor vrachtwagens gelijk veronderstellen aan het effect van textuur voor personenwagens dan wordt een totale uitstoot van 156,6 kton gevonden.

De CO₂-emissie van middelzware motorvoertuigen komt op circa 190 kton per jaar uit. Hierbij is hetzelfde verband verondersteld als voor zware motorvoertuigen. De totale emissie van vrachtverkeer bedraagt hiermee dus circa 350 kton per jaar. Van de totale CO₂-emissie van het verkeer wordt circa 62% veroorzaakt door personenwagens en 38% door vrachtwagens.

5 Fijnstof en NO_x emissie

5.1 Gebruikte kentallen

De keuze voor wegdektypen met een lagere rolweerstand is niet alleen effectief om de CO₂-emissie te reduceren, maar heeft ook effect op alle andere (verontreinigende) uitlaatemissies van het verkeer, zoals (ultrafijne) deeltjes, elementair koolstof (EC, roet) en NO_x. In het kader van het Innovatieprogramma Luchtkwaliteit (IPL) is onderzoek gedaan naar het effect van wegdekmaatregelen op de luchtkwaliteit [13].

Er zijn emissiefactoren voor NO_x en PM₁₀ volgens SRM 1 [14], waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen stagnerend stadsverkeer, normaal stadsverkeer, doorstromend stadsverkeer en buitenweg verkeer. In tabel IV zijn de emissiefactoren voor lichte-, middelzware- en zware motorvoertuigen weergegeven voor de categorie "Buitenweg algemeen".

tabel IV *Emissiefactoren volgens SRM 1 voor niet-snelwegen voor de categorie "Buitenweg algemeen" [14]*

	emissie in [g/km]		
	lichte motorvoertuigen	middelzware motorvoertuigen	zware motorvoertuigen
NO _x	0,25	4,75	6,13
PM ₁₀ *)	0,023	0,128	0,130

*) Betreft de verbranding en slijtage naar lucht

De totale emissie van fijnstof is opgebouwd uit wegdekslijtage, bandenslijtage en uitlaatemissie, waarbij de uitlaatemissie domineert. De gegevens uit tabel IV betreffen het gecombineerde effect van wegdekslijtage, bandenslijtage en uitlaatemissie. De uitlaatemissie wordt bepaald op basis van het verschil tussen de emissiefactoren uit tabel IV en de som van de bandenslijtage en wegdekslijtage uit tabel V.

In opdracht van Rijkswaterstaat is door Deltares en TNO de emissiebron "wegdekslijtage wegverkeer" en "bandenslijtage wegverkeer" [15] [16] in kaart gebracht. De gegevens zijn samengesteld uit diverse onderzoeken op dit gebied. De slijtagebronnen in de totale PM₁₀ uitstoot zijn weergegeven in tabel V.

tabel V *Emissiefactoren per slijtagebron in totale fijnstof uitstoot [15] [16]*

	emissie in [mg/km]		
	lichte motorvoertuigen	middelzware motorvoertuigen *)	zware motorvoertuigen
Bandenslijtage			
PM ₁₀ **)	5	6	30
Wegdekslijtage (landelijke wegen)			
PM ₁₀ **)	5,5	5,5	29

*) Betreft de categorie 'bestelauto's

**) Betreft de verbranding en slijtage naar lucht

5.2 Schattingen voor provincie Gelderland

Op basis van de inzichten die in dit rapport beschreven zijn ten aanzien van het verschil in textuur van verschillende wegdektypen en het aandeel van de rolweerstand in de totale wrijvingskracht van voertuigen, is een berekening gemaakt van de CO₂, NO_x en PM₁₀-uitstoot van het Gelderse wegennet, zie tabel VI. Voor deze berekening is gebruik gemaakt van de emissiefactoren uit tabel IV en tabel V. Bij de berekeningen is gebruik gemaakt van de textuurdata uit 2013 en de verkeersintensiteit uit 2012.

tabel VI CO₂, NO_x en PM₁₀-emissie op basis van de textuurgegevens uit 2013 en de verkeersintensiteit uit 2012

	emissie [ton]			
	lichte motorvoertuigen	middelzware motorvoertuigen	zware motorvoertuigen	totaal
CO ₂ -emissie ongecorrigeerd	578.960	191.580	157.990	928.530
CO ₂ -emissie gecorrigeerd ¹⁾	573.650	190.970	156.640	921.260
NO _x -emissie ongecorrigeerd	818	1.185	959	2.962
NO _x -emissie gecorrigeerd ²⁾	810	1.181	956	2.948
PM ₁₀ -emissie bandenslijtage	16	2	5	23
PM ₁₀ -emissie wegdekslijtage	18	1	5	24
PM ₁₀ -emissie uitlaat ongecorrigeerd	41	29	11	81
PM ₁₀ -emissie uitlaat gecorrigeerd ³⁾	41	29	11	81
totaal CO ₂ gecorrigeerd	573.650	190.970	156.640	921.260
totaal NO _x gecorrigeerd	810	1.181	956	2.948
totaal PM ₁₀ gecorrigeerd	75	32	20	127

¹⁾ De verhouding rolweerstand en CO₂-uitstoot is 1/3 voor lichte motorvoertuigen, 0,5 voor middelzware motorvoertuigen en 0,5 voor zware motorvoertuigen

²⁾ De verhouding rolweerstand en NO_x-uitstoot is 1/3 voor lichte motorvoertuigen, 0,5 voor middelzware motorvoertuigen en 0,5 voor zware motorvoertuigen

³⁾ De verhouding rolweerstand en PM₁₀ uitlaat emissie is 1/3 voor lichte motorvoertuigen, 0,5 voor middelzware motorvoertuigen en 0,5 voor zware motorvoertuigen

De gecorrigeerde emissie wordt berekend op dezelfde wijze als in paragraaf 4.2. Als gemiddelde rolweerstand voor personenwagens wordt conform paragraaf 4.2 8,8 kg/t gebruikt. Voor zware motorvoertuigen wordt formule (5) gebruikt om de rolweerstandscoefficiënt te bepalen. Voor middelzware motorvoertuigen wordt hetzelfde verband gebruikt als voor middelzware motorvoertuigen. Als referentie rolweerstand voor deze categorieën wordt 5,4 kg/t gebruikt. Dit is de gemiddelde rolweerstand van een typische vrachtwagenband op wegdekken met een fijne en grove structuur.

Voor de totale PM₁₀-uitstoot wordt de som berekend van "PM₁₀-emissie bandenslijtage", "PM₁₀-emissie wegdekslijtage" en "PM₁₀-emissie uitlaat gecorrigeerd". Ten gevolge van het huidige

wegdekbeleid is er sprake van een reductie van de NO_x- en PM₁₀-emissie ten opzichte van de situatie 2003 van 0,4 resp. 0,7%. Dit betreffen reducties uitgaande van de totale emissies voor lichte, middelzware en zware motorvoertuigen.

5.3 Vergelijking met andere bronnen

Om een indruk te krijgen hoe de geschatte totale emissies zich verhouden tot informatie uit andere bronnen, wordt in deze paragraaf een vergelijking gemaakt met informatie van het CBS en uit de Compendium van de Leefomgeving.

In figuur 18 staat een overzicht van de CO₂-emissies van wegverkeer over het gehele Nederlandse wegennet. De in dit rapport berekende totale CO₂-emissie in de provincie Gelderland (circa 930 kton per jaar) is circa 11% van de totale emissie op buitenwegen uit de CBS-cijfers. Dit komt aardig overeen met de omvang van het wegennet in Gelderland en de gemiddelde verkeersintensiteiten.

Onderwerpen	Emissies				
	Emissie CO ₂				
	Totaal	Bebouwde	Buitenwegen	Autosnelw	
→ Bronnen	← Methoden	m/ln kg			
Wegverkeer-totaal	2012*	31 154	7 759	8 640	14755
Personenauto's	2012*	19 353	5 327	5 883	8142
Motortweewielers	2012*	302	47	112	142
Bromfietsen	2012*	42	30	13	
Bestelauto's	2012*	4 162	831	1 102	2228
Vrachtauto's	2012*	2 128	491	436	1201
Trekkers	2012*	4 046	393	841	2812
Autobussen	2012*	556	255	140	161
Speciale voertuigen	2012*	565	384	112	69

figuur 18 CO₂-uitstoot wegverkeer voor 2012. Bron: CBS StatLine [7]

Het Compendium voor de Leefomgeving heeft ook cijfers over andere emissies van wegverkeer over 2012. De totale emissies CO₂, NO_x en PM₁₀ over 2012 zijn weergegeven in figuur 19. De emissies van wegverkeer in de provincie Gelderland zijn ongeveer 4% van de totale CO₂-emissie, 5% van de totale NO_x-emissie en 3% van de totale PM₁₀-emissie. De resultaten in dit rapport lijken aan te sluiten wat betreft orde grootte met de cijfers uit deze andere bronnen.

Vergelijk met emissies Compendium voor de leefomgeving	emissie [ton]				
	lmv	mmv	zmv	totaal	waarvan GLD
CO ₂ -emissie	19.400.000	4.200.000	2.100.000	25.700.000	4%
NO _x -emissie	27.000	13.000	15.000	55.000	5%
PM ₁₀ -emissie (excl. slijtagebronnen)	1.300	1.500	210	3.010	3%

figuur 19 Emissies naar lucht door wegverkeer, 2012 [8]

6 Scenario studies

6.1 Scenario's

Op basis van de uitgangssituatie van de CO₂-uitstoot over 2012/2013 kunnen scenariostudies worden uitgevoerd. Hierbij wordt inzicht verkregen in de effecten vanuit ontwikkelingen van de afgelopen jaren en verwachtingen voor de komende jaren met betrekking tot wegdekbeleid en verkeersintensiteit.

Een overzicht van de onderzochte scenario's is weergegeven in tabel VII. Als referentie wordt steeds de uitgangssituatie 2012/2013 gehanteerd. Voor deze situatie geldt dat het wegdektype verdeeld blijkt te zijn in drie ongeveer gelijke delen, met dunne geluidreducerende deklagen (DGAD), dicht asfaltbeton (DAB) en SMA (zowel 0/8 als 0/11). De gemiddelde rolweerstand van DGAD en DAB ligt dicht bij elkaar, de rolweerstand van SMA ligt circa 7% hoger dan bij DGAD. Een overzicht van de rolweerstandscoefficienten per wegdektype en de herkomst hiervan is weergegeven in tabel VIII.

tabel VII

Onderzochte scenario's

nummer	omschrijving	rolweerstandscoefficiënt [kg/t]
Referentie scenario 2012/2013		
ref	1/3 DGAD, 1/3 DAB, 1/3 SMA11	8,7 / 8,8 / 9,2
Mogelijke scenario's uit het verleden		
1	overall SMA 11	9,2
2	40 % SMA 11 en 60 % DAB 16	9,2/ 8,8
3	overall ZOAB 16	9,8
Mogelijke toekomstscenario's		
4	overall DGAD (of DAB)	8,7
5	2/3 SMA 8G+, 1/3 DGAD	8,9 / 8,7
6	overall SMA 8G+	8,9

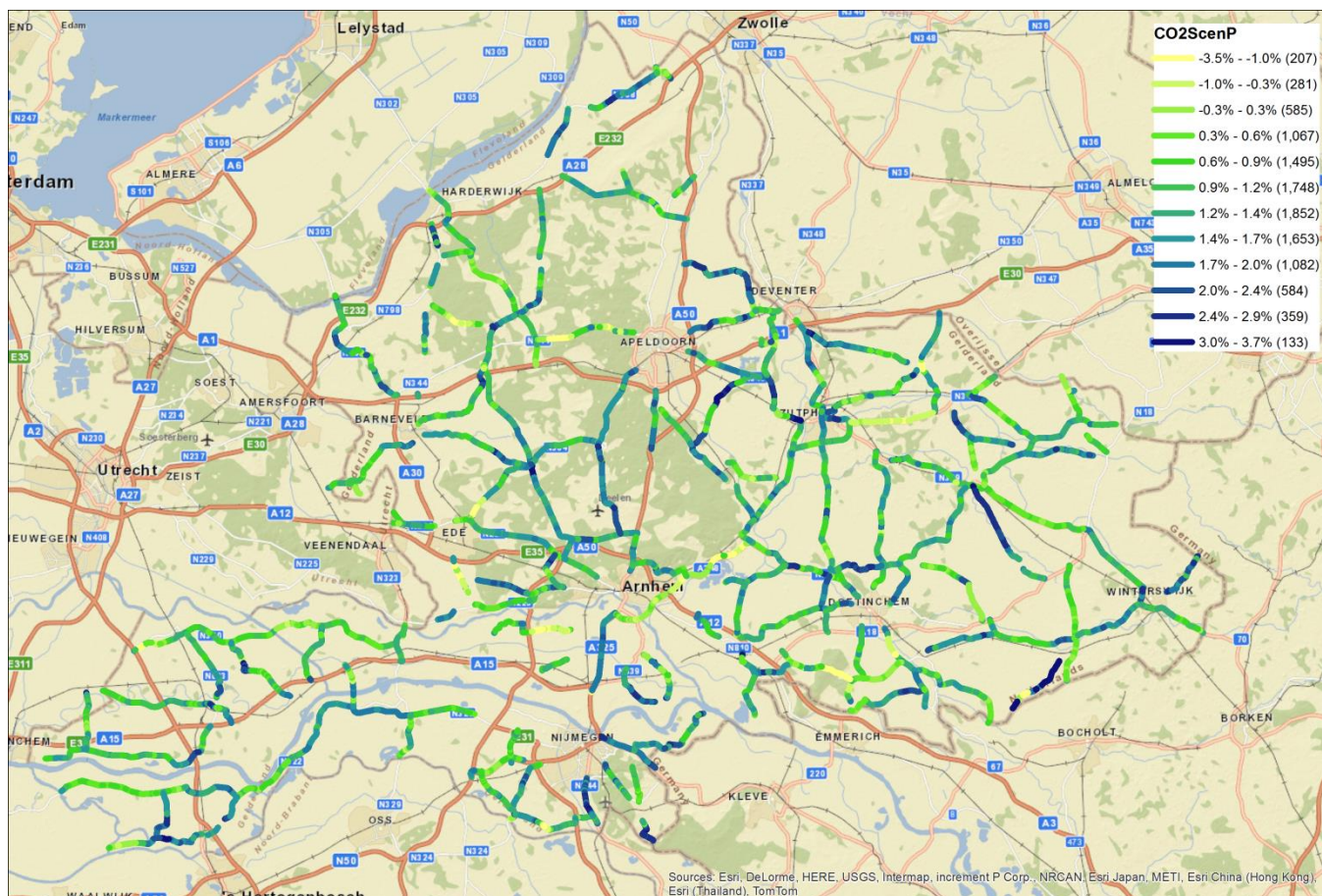
tabel VIII In de scenariostudies gebruikte rolweerstandscoefficienten per wegdektype

wegdektype	rolweerstandscoefficient [kg/t]	bron
DAB	8,8	gemiddelde rolweerstand voor DAB volgens [1]
DGAD	8,7	gemiddelde rolweerstand voor DGAD volgens [1]
SMA 8	8,9	gemiddelde rolweerstand voor 0/8 wegdekken volgens [1]
SMA 11	9,2	gemiddelde rolweerstand van 0/5, 0/8, 0/11 en 0/16 wegdekken volgens [1]
ZOAB 16	9,8	gemiddelde rolweerstand voor 0/16 wegdekken volgens [1]

Bij het uitvoeren van de scenariostudies wordt steeds maar één parameter veranderd. Vervolgens wordt voor ieder 100 meter wegvak de verandering in CO₂-uitstoot berekend, in een figuur weergegeven, waarna de totale CO₂-uitstoot wordt bepaald en vergeleken met de totale emissie van de uitgangssituatie. In de scenario's is geen rekening gehouden met effecten van verkeersgroei en het schoner worden van voertuigen. De te verwachten effecten hiervan worden in de laatste paragraaf toegelicht.

6.2 Scenario 1: overall SMA 11

In het scenario “overall SMA 11” wordt voor alle wegvakken de rolweerstandscëfficiënt van SMA 11 verondersteld. Uit het brede onderzoek rolweerstand blijkt dat de gemiddelde rolweerstandscëfficiënt van SMA 11 circa 9,15 kg/t bedraagt. In figuur 20 is het resultaat van de berekening te zien.



figuur 20 Scenario 1: Overall SMA 11 (RRC = 9,15 kg/t). Op de kaart is de verandering van de CO₂-uitstoot ten opzichte van de referentie situatie weergegeven. Een positief percentage geeft aan dat de uitstoot in dit scenario is toegenomen ten opzichte van de referentie situatie. Een negatief percentage geeft aan dat de uitstoot in dit scenario is afgenomen ten opzichte van de referentiesituatie.

De totale CO₂-uitstoot voor dit scenario bedraagt 585 kton per jaar. Dit is een *toename* ten opzichte van de referentie situatie 2012/2013 van 6 kton/jaar (1,1 %).

6.3 Scenario 2: 40 % SMA 11 en 60 % DAB 16

In het scenario “40 % SMA 11 en 60 % DAB 16” wordt voor de 40 % wegvakken met de hoogste verkeersintensiteit de rolweerstandscoefficiënt van SMA 11 verondersteld. Voor de overige wegvakken geldt de rolweerstandscoefficiënt van DAB 16.

Uit het brede onderzoek rolweerstand blijkt dat de gemiddelde rolweerstandscoefficiënt van SMA 11 en DAB 16 respectievelijk 9,15 kg/t en 8,77 kg/t bedraagt. In figuur 21 is het resultaat van de berekening te zien.

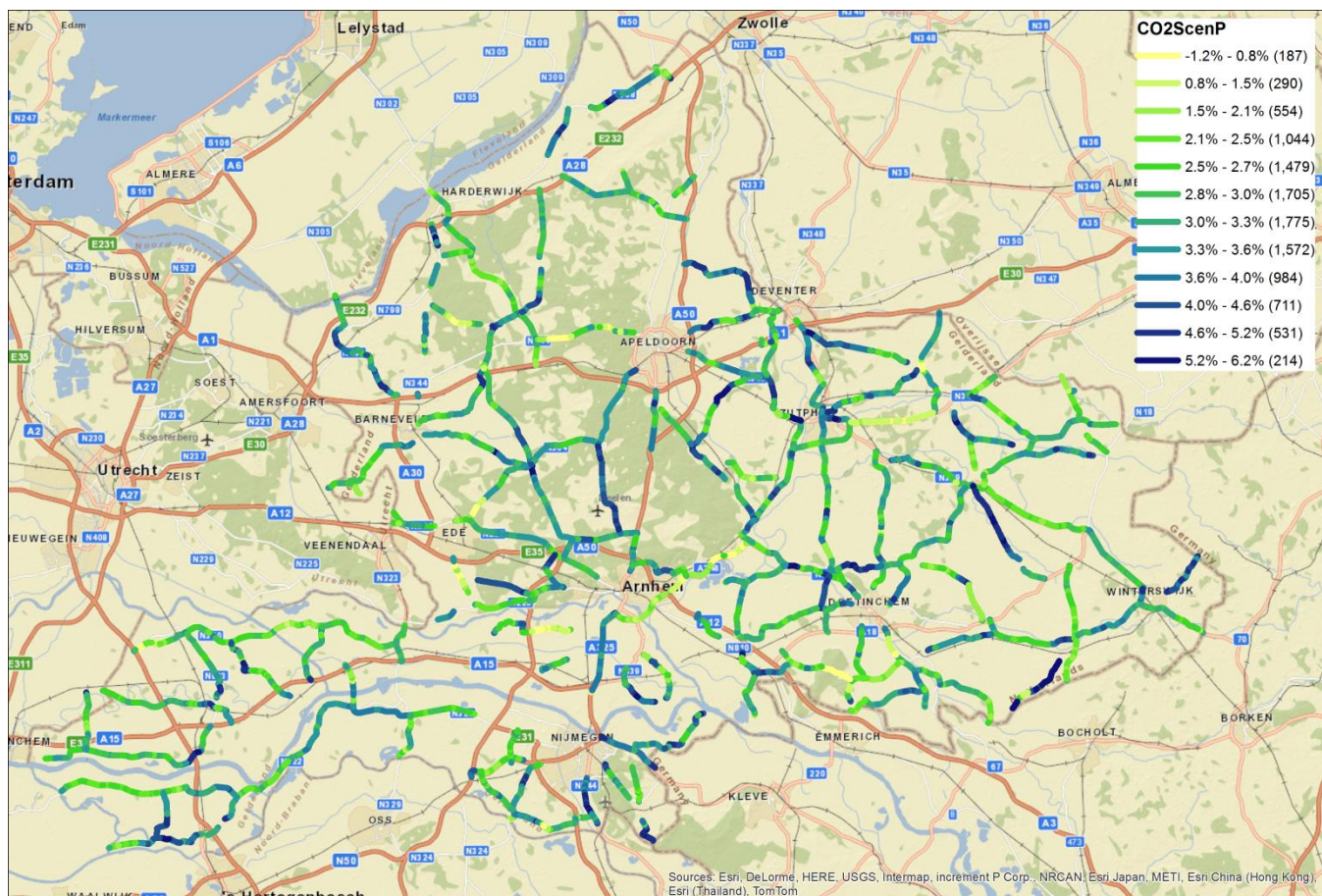


figuur 21 Scenario 2: 40 % SMA 11 en 60 % DAB 16 ($RRC_{SMA11} = 9,15 \text{ kg/t}$ en $RRC_{DAB16} = 8,77 \text{ kg/t}$). Op de kaart is de verandering van de CO₂-uitstoot ten opzichte van de referentie situatie weergegeven. Een positief percentage geeft aan dat de uitstoot in dit scenario is toegenomen ten opzichte van de referentie situatie. Een negatief percentage geeft aan dat de uitstoot in dit scenario is afgenomen ten opzichte van de referentie situatie.

De totale CO₂-uitstoot voor dit scenario bedraagt 581 kton per jaar. Dit is een *toename* ten opzichte van de referentie situatie 2012/2013 van 2 kton/jaar (0,4 %).

6.4 Scenario 3: overall ZOAB 16

In het scenario “overall ZOAB 16” wordt voor alle wegvakken de rolweerstandscoefficiënt van ZOAB 16 verondersteld. Uit het brede onderzoek rolweerstand blijkt dat de gemiddelde rolweerstandscoefficiënt van ZOAB 16 circa 9,8 kg/t bedraagt. In figuur 22 is het resultaat van de berekening te zien.

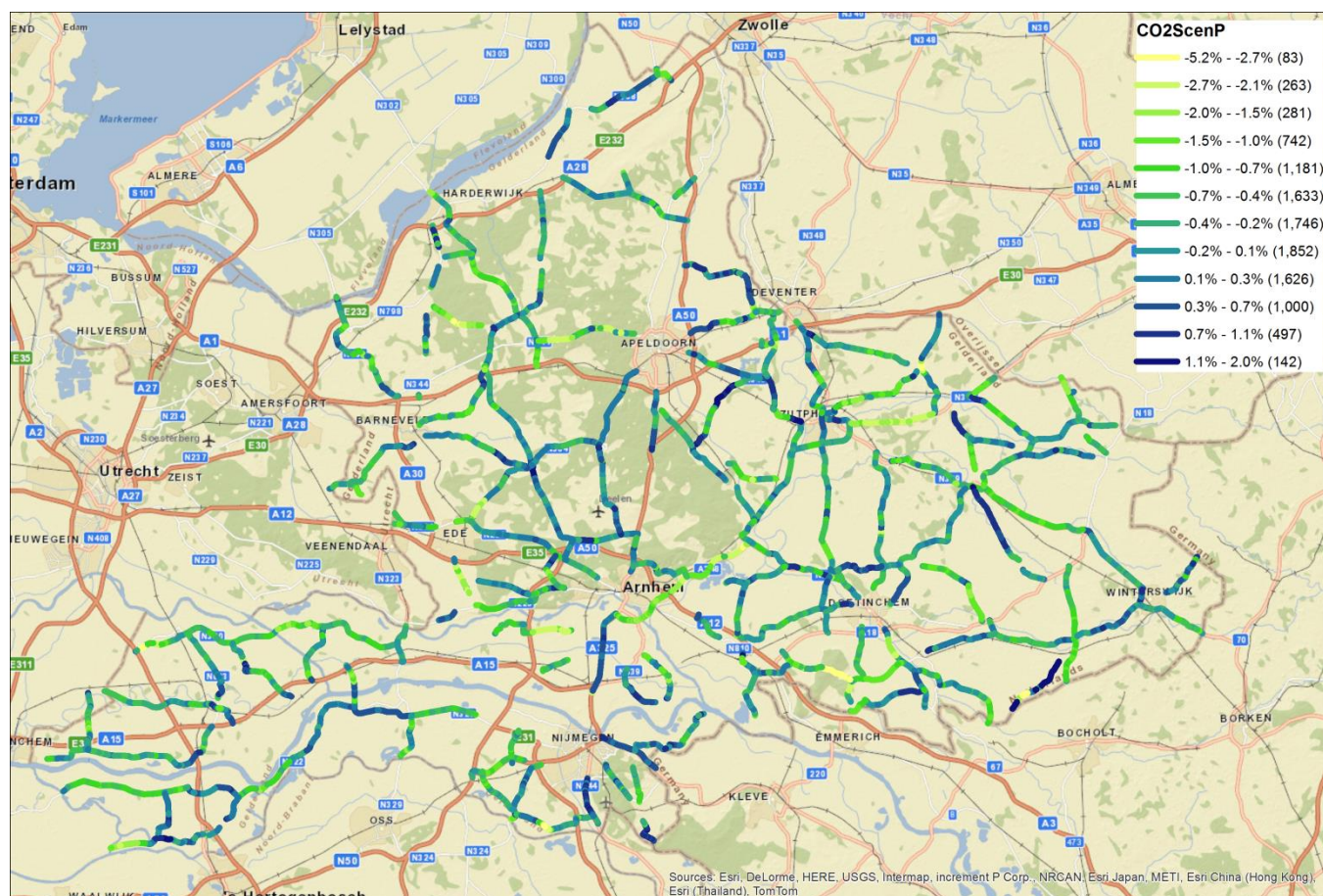


figuur 22 Scenario 3: Overall ZOAB 16 (RRC = 9,8 kg/t). Op de kaart is de verandering van de CO₂-uitstoot ten opzichte van de referentie situatie weergegeven. Een positief percentage geeft aan dat de uitstoot in dit scenario is toegenomen ten opzichte van de referentie situatie. Een negatief percentage geeft aan dat de uitstoot in dit scenario is afgenomen ten opzichte van de referentie situatie.

De totale CO₂-uitstoot voor dit scenario bedraagt 596 kton per jaar. Dit is een *toename* ten opzichte van de referentie situatie 2012/2013 van 17 kton/jaar (3,0 %).

6.5 Scenario 4: overall DGAD (of DAB)

In het scenario “overall DGAD (of DAB)” wordt voor alle wegvakken de rolweerstandscoefficiënt van DGAD verondersteld. Uit het brede onderzoek rolweerstand blijkt dat de gemiddelde rolweerstandscoefficiënt van DGAD circa 8,67 kg/t bedraagt. In figuur 23 is het resultaat van de berekening te zien.



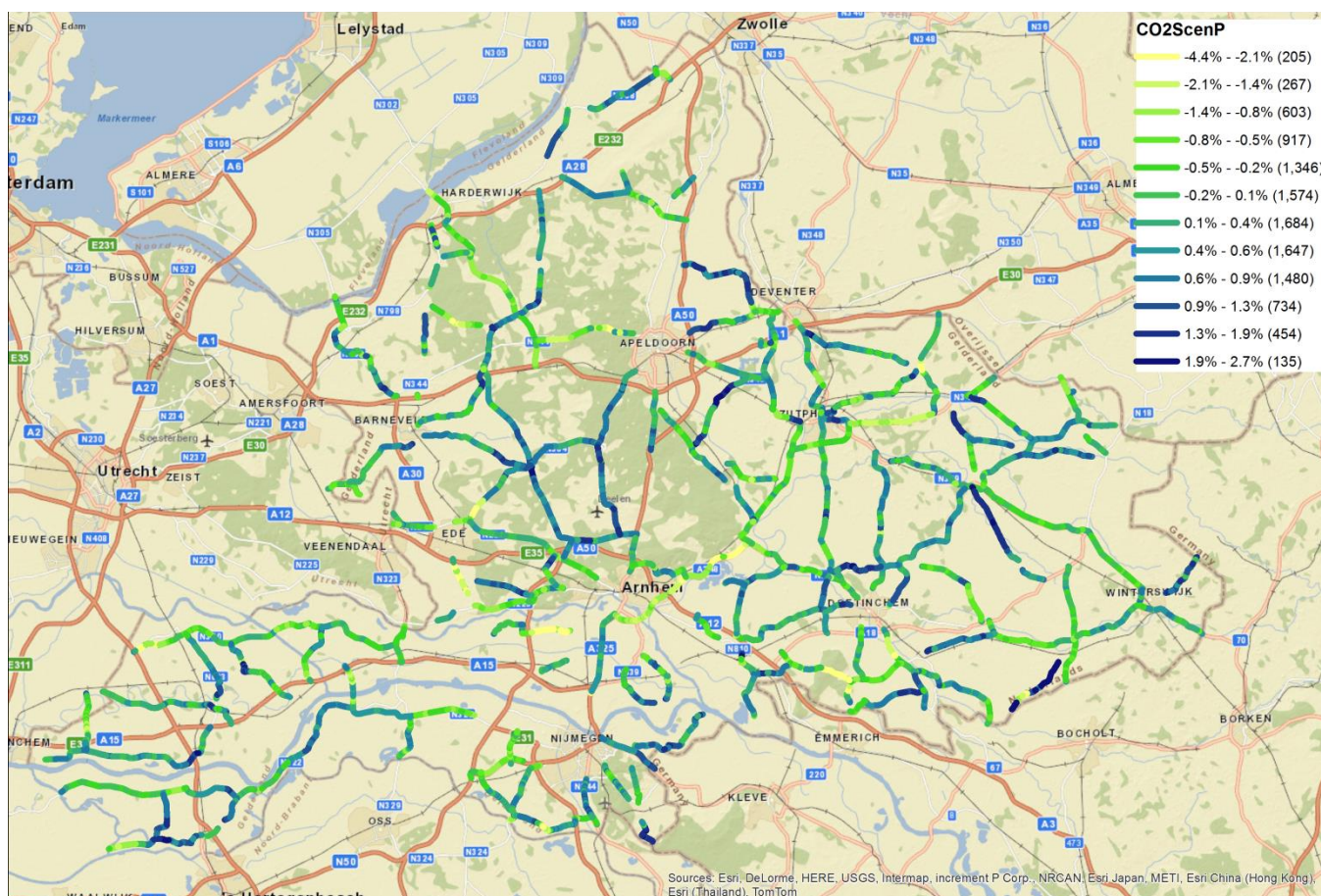
figuur 23

Scenario 4: Overall DGAD (RRC = 8,67 kg/t). Op de kaart is de verandering van de CO₂-uitstoot ten opzichte van de referentie situatie weergegeven. Een positief percentage geeft aan dat de uitstoot in dit scenario is toegenomen ten opzichte van de referentie situatie. Een negatief percentage geeft aan dat de uitstoot in dit scenario is afgenomen ten opzichte van de referentie situatie.

De totale CO₂-uitstoot voor dit scenario bedraagt 576 kton per jaar. Dit is een afname ten opzichte van de referentie situatie 2012/2013 van 3 kton/jaar (0,4 %).

6.6 Scenario 5: 2/3 SMA 8G+ en 1/3 DGAD

In dit scenario wordt voor 1/3 van de wegvakken met de hoogste verkeersintensiteit de rolweerstandscoefficiënt van DGAD verondersteld. Voor de overige wegvakken is de rolweerstand gelijk aan SMA 8 (G+). Uit het brede onderzoek rolweerstand blijkt dat de gemiddelde rolweerstandscoefficiënt van DGAD circa 8,67 kg/t bedraagt en de gemiddelde rolweerstandscoefficiënt van SMA 8 (G+) is 8,89 kg/t. In figuur 24 is het resultaat van de berekening te zien.

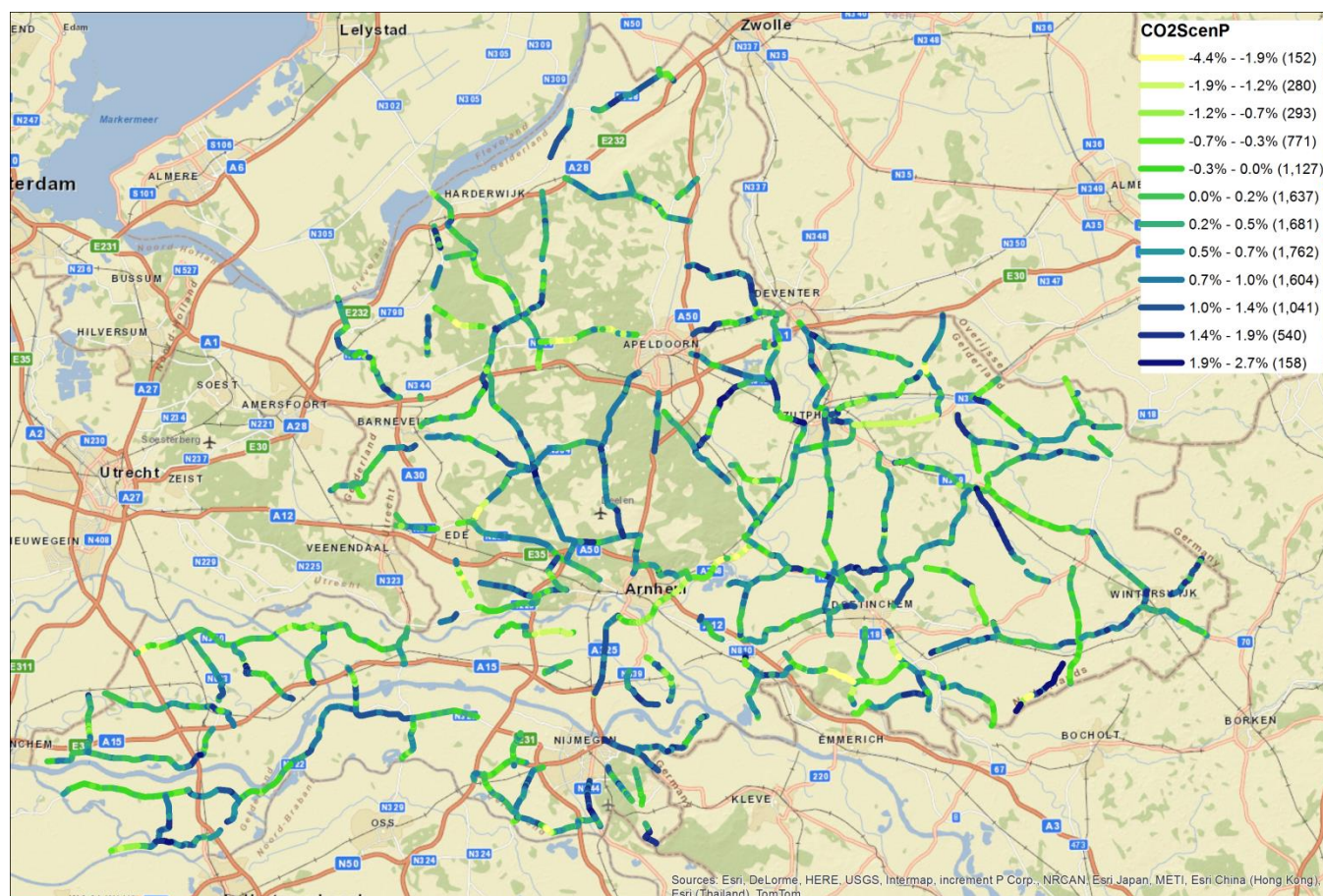


figuur 24 Scenario 5: 2/3 SMA 8G+ en 1/3 DGAD ($RRC_{SMA8} = 8,89 \text{ kg/t}$ en $RRC_{DGAD} = 8,67 \text{ kg/t}$). Op de kaart is de verandering van de CO₂-uitstoot ten opzichte van de referentie situatie weergegeven. Een positief percentage geeft aan dat de uitstoot in dit scenario is toegenomen ten opzichte van de referentie situatie. Een negatief percentage geeft aan dat de uitstoot in dit scenario is afgenomen ten opzichte van de referentie situatie.

De totale CO₂-uitstoot voor dit scenario bedraagt 578 kton per jaar. Dit is een *afname* ten opzichte van de referentie situatie 2012/2013 van 1 kton/jaar (0,2 %)

6.7 Scenario 6: overall SMA 8G+

In het scenario “overall SMA 8G+” wordt voor alle wegvakken de rolweerstandscoefficiënt van SMA 8 verondersteld. Uit het brede onderzoek rolweerstand blijkt dat de gemiddelde rolweerstandscoefficiënt van SMA 8 circa 8,89 kg/t bedraagt. In figuur 25 is het resultaat van de berekening te zien.



figuur 25 Scenario 6: overall SMA 8G+ ($RRC_{SMA8} = 8,89 \text{ kg/t}$). Op de kaart is de verandering van de CO₂-uitstoot ten opzichte van de referentie situatie weergegeven. Een positief percentage geeft aan dat de uitstoot in dit scenario is toegenomen ten opzichte van de referentie situatie. Een negatief percentage geeft aan dat de uitstoot in dit scenario is afgenomen ten opzichte van de referentie situatie.

De totale CO₂-uitstoot voor dit scenario bedraagt 580 kton per jaar. Dit is een *toename* ten opzichte van de referentie situatie 2012/2013 van 1 kton/jaar (0,3 %)

6.8 Effecten van verkeersgroei

Uit de verkeersprognose van provincie Gelderland blijkt dat de groei van de verkeersintensiteit over de afgelopen jaren circa 2,0 tot 2,5 % per jaar was. Voor de komende jaren wordt een groeipercentage van maximaal 1,0 % per jaar verwacht. Met deze gegevens is de CO₂-uitstoot per wegvak bepaald voor de situatie 2022 (toekomstscenario). Hierbij wordt ervan uitgegaan dat gemiddelde verkeersgroei over de jaren 2012 – 2022 1,0 % per jaar bedraagt. De verandering van de CO₂-uitstoot ten opzichte van de referentie 2012/2013 wordt weergegeven in figuur 26.



figuur 26 CO₂-uitstoot in 2022 op basis van een autonome groei van 1,0% per jaar. Op de kaart is de verandering van de CO₂-uitstoot ten opzichte van de referentie situatie weergegeven. Een positief percentage geeft aan dat de uitstoot in dit scenario is toegenomen ten opzichte van de referentie situatie.

De totale CO₂-emissie in 2022 bedraagt 640 kton per jaar. Dit is een *toename* ten opzichte van de referentie situatie 2012/2013 van 61 kton/jaar (10,5 %). In deze berekening is geen rekening gehouden met het effect van het schoner worden van voertuigen. Naar verwachting zal in de komende 10 jaar de gemiddelde CO₂-emissie 8-10% afnemen [18], waardoor de toename ten gevolge van verkeersgroei grotendeels wordt te niet gedaan door het schoner worden van de voertuigen.

Omdat het effect van de groei en het schoner worden van het verkeer niet nauwkeurig is te bepalen en omdat het voor alle (vorige) scenario's in gelijke mate optreedt, is met deze effecten in de scenario's geen rekening gehouden.

7 Overzicht resultaten en interpretatie

7.1 Overzicht resultaten

Een overzicht van alle situaties met berekende CO₂-uitstoot en de verandering ten opzichte van de referentie situatie 2012/2013 staat in tabel IX. Daarnaast is ook de brandstofbesparing ten opzichte van de referentiesituatie weergegeven. Hierbij is uitgegaan van een gemiddeld brandstofverbruik van 12 km/l voor benzine auto's en 16 km/l voor diesel auto's.

tabel IX Overzicht CO₂-uitstoot en verandering ten opzichte van referentie 2012/2013 voor de doorgerekende scenario's (alleen personenwagens)

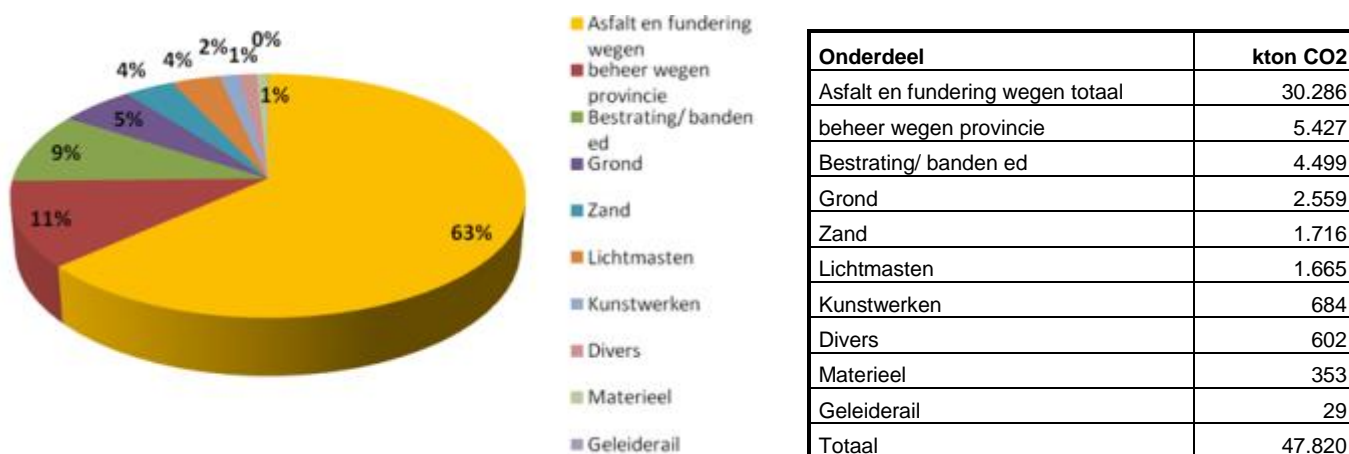
nummer	omschrijving	CO ₂ -uitstoot [kton/jaar]	CO ₂ -verandering t.o.v. referentie [kton/jaar]	CO ₂ -verandering t.o.v. referentie [%]	Brandstof verbruik verandering t.o.v. referentie [mln liter]
Referentie scenario 2012/2013					
ref	1/3 DGAD, 1/3 DAB, 1/3 SMA	579	-	-	-
Mogelijke scenario's uit het verleden					
1	overall SMA 11	585	+6	+1,1	+2,5
2	40 % SMA 11 en 60 % DAB 16	581	+2	+0,4	+0,9
3	overall ZOAB 16 (RWS)	596	+17	+3,0	+6,8
Mogelijke toekomstscenario's					
4	overall DGAD (of DAB)	576	-3	-0,4	-9,1
5	2/3 SMA 8G+ en 1/3 DGAD	578	-1	-0,2	-0,5
6	overall SMA 8G+	580	+1	+0,3	+0,7

Om invulling te geven aan duurzaamheidsbeleid is in 2012 door Movares in opdracht van provincie Gelderland een carbon footprint van de Gelderse wegen opgesteld [9]. De carbon footprint brengt de activiteiten in kaart die een bijdrage leveren aan de totale CO₂-uitstoot. Zowel nieuwbouw als groot onderhoud is hierbij meegenomen.

In de volgende paragraaf worden de resultaten uit hoofdstuk 6 in perspectief geplaatst door deze te vergelijken met de carbon footprint voor groot onderhoud en beheer. Bedenk dat bij de scenariostudies alleen gekeken is naar de uitstoot van lichte motorvoertuigen. Als ook de emissie van vrachtwagens meegenomen wordt, dan is de emissie van het verkeer circa 60% hoger.

7.2 Vergelijk resultaat scenariostudies met carbon footprint

De totale carbon footprint van de Gelderse wegen in 2012 is weergegeven in figuur 27.



figuur 27 Totale carbon footprint nieuwbouw, groot onderhoud en beheer [9] in ton CO₂

De totale CO₂-uitstoot voor nieuwbouw en groot onderhoud van de verhardingen bedraagt circa 30 kton per jaar. In de scenariostudies is steeds de situatie 2012/2013 als uitgangspunt gekozen. De CO₂-uitstoot door lichte motorvoertuigen over 2012/2013 is berekend op basis van textuurparameters en komt uit op circa 580 kton per jaar en ligt daarmee een factor twintig hoger dan de eigen emissie van de provincie.

Bij het vergelijken van de carbon footprint (groot onderhoud en beheer) en de CO₂-uitstoot door lichte motorvoertuigen over 2012/2013 valt het volgende op:

- De totale CO₂-uitstoot voor de Gelderse wegen bedraagt 580 + 30 = 610 kton per jaar;
- Op jaarbasis wordt 95 % van de totale uitstoot veroorzaakt door het verkeer (alleen lichte motorvoertuigen) en 5 % door aanleg van asfalt en fundering;
- In het gunstigste scenario ("alles DGAD") wordt de CO₂-uitstoot door het verkeer met 2,2 kton per jaar verminderd. Dit is 7 % van de post "Asfalt en fundering wegen";
- In de carbon footprint wordt geconstateerd dat een besparing van 10% op de footprint van dagelijks beheer, ongeveer 1% verlaging geeft van de totale footprint, ofwel 0,5 kton per jaar. In een mogelijk toekomstscenario 2/3 SMA NL-8G+ en 1/3 DGAD wordt 0,2% van de totale CO₂-uitstoot door verkeer bespaard. In 2012 of 2013 is dat ruim 1 kton per jaar.

7.3 Classificatie wegdektypen voor rolweerstand

Uit het onderzoek is duidelijk geworden dat de rolweerstand van wegdektypen te classificeren is aan de hand van de gradering van het wegdektype en de textuureigenschappen.

Op basis van de resultaten van [1] is een classificatie afgeleid voor de textuur- en rolweerstandswaarden van verschillende wegdektypen waardoor het mogelijk is om een (globale) klassenindeling te maken voor beleids- en beheerdoeleinden. De in de tabel opgenomen klassenindeling is gebaseerd op de eigenschappen van wegdektypen in nieuwstaat.

tabel X

Classificatie van wegdektypen op basis van MPD en rolweerstandscoefficiënt

Klasse	Wegdektype (in nieuwstaat)	MPD-waarde [mm]	Rolweerstandscoefficiënt [kg/t]
A	DAB / DGAD / SMA8 / Tweelaags ZOAB	< 1,2	< 9,0
B	ZOAB11 / SMA11	1,2 - 1,6	9,0 - 9,5
C	ZOAB16 / oppervlakbehandeling	> 1,6	> 9,5

Conclusies

Dit project heeft de volgende doelstellingen.

- Een overzicht krijgen (met behulp van textuur-rolweerstandmodel) van de rolweerstand van het gehele wegennetwerk van de provincie Gelderland.
- Inzicht krijgen in verschillen in CO₂-emissie van het verkeer (personenauto's) voor het provinciale wegennet.
- Inzicht krijgen in CO₂-emissie-effecten voor interessante scenario's, vanuit ontwikkelingen van de afgelopen jaren en verwachtingen voor de komende jaren met betrekking tot wegdekbeleid en verkeersintensiteiten.
- Inzicht krijgen in een voor provincie Gelderland optimale situatie vanuit het perspectief van rolweerstand / CO₂-emissie.

In totaal zijn er zes scenario's doorgerekend, waarbij de CO₂-effecten op 100 meter vakken detail zichtbaar zijn gemaakt op een kaart. Als uitgangspunt is hierbij steeds de situatie 2012/2013 gebruikt. Bij de scenariostudies is steeds één parameter gewijzigd. In de meeste gevallen wordt de rolweerstandcoëfficiënt per 100 meter wegvaklengte gevarieerd, door het kiezen van een ander wegdektype.

De volgende drie scenario's zijn doorgerekend, waarbij de CO₂-effecten van wegdekkeuzes uit het verleden in kaart zijn gebracht:

- 100% SMA 11
- 40% SMA 11 en 60% DAB 16
- 100% ZOAB 16 (RWS)

Daarnaast is het effect van drie mogelijke toekomstscenario's op de CO₂-uitstoot bepaald:

- 100% DGAD
- 2/3 SMA 8G+ en 1/3 DGAD
- 100% SMA 8G+

Om inzicht te krijgen in het effect van verkeersgroei op de CO₂-uitstoot zijn met de verkeersprognoses over de jaren 2012 tot 2022 de verwachte CO₂-emissies bepaald in het jaar 2022 ten opzichte van de uitgangssituatie 2012/2013.

Het scenario "40% SMA 11 en 60% DAB 16" komt overeen met de feitelijke situatie in 2003. Ten opzichte van de referentie situatie 2012/2013 is de CO₂-uitstoot met 0,4% per jaar gedaald. Het betreft een absolute besparing van 2 kton per jaar.

Een realistisch toekomstscenario is 2/3 SMA 8G+ en 1/3 DGAD. Hiermee wordt een CO₂-besparing van circa 0,2% op jaarbasis gerealiseerd, ten opzichte van de referentiesituatie 2012/2013. De absolute besparing is 1 kton per jaar.

Uitgaande van een autonome groei van 1% per jaar vanaf 2012 tot 2022, stijgt de CO₂-emissie van 579 kton per jaar in de uitgangssituatie naar 640 kton per jaar in 2022. Het betreft een stijging van 10,5%. De kanttekening bij deze stijging is dat door het schoner worden van het verkeer ook een reductie in deze orde grootte wordt verwacht.

Het reduceren van de rolweerstand heeft naast een afname van de CO₂-uitstoot ook een gunstig effect op NO_x en fijnstof emissie. Ten gevolge van het huidige wegdekbeleid (ten opzichte van de situatie in 2003) is er sprake van een reductie van de NO_x- en PM₁₀-emissie van 0,4 resp. 0,7%. Dit betreffen reducties uitgaande van de totale emissies voor lichte, middelzware en zware motorvoertuigen.

Literatuur

- [1] Hooghwerff, J. et al, "Influence of road surface type on rolling resistance – Results of the measurements 2013", M+P.DVS.12.08.3, revision 4, 20-11-2013;
- [2] Hooghwerff, J. et al, "Enhancements of texture vs rolling resistance model", M+P.PWG.13.04.1, revision 3, 20-2-2014;
- [3] Michelin, "The Tyre Encyclopedia, Vol. 3", 2003;
- [4] Michelin, "The tyre – rolling resistance and fuel savings", 2003.
- [5] ATZ, "Optimiertes Transportkonzept für Sattelzüge", ATZ, februari 2008;
- [6] CBS StatLine, "Verkeersprestaties; kilometers naar voertuigtype en grondgebied", 1-11-2013;
- [7] CBS StatLine, "Luchtverontreiniging, feitelijke emissies door wegverkeer", 28-2-2014;
- [8] Compendium voor de Leefomgeving, "Emissies naar lucht door wegverkeer, 2012", <http://www.compendiumvoordeleefomgeving.nl/indicatoren/nl0130-Emissies-naar-lucht-door-wegverkeer.html>, 09-10-2013;
- [9] Verheul, D.J., "Carbon footprint van de Gelderse wegen", 19-06-2012;
- [10] Bode, Dr.-Ing. O, et al, "Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugaufreifen auf echten Fahrbahnen", 2013;
- [11] "CO₂-factoren in de Milieubarometer, Stichting Stimular", http://www.milieubarometer.nl/uploads/files/CO2_factoren_2010_mei_en_juni_2011_dd_26_juni_2011_NL.pdf, 2011;
- [12] Reinink, F. et al., "Rolling resistance of concrete road surfaces", M+P report CBC.13.01.1, November 2013;
- [13] Van Blokland et al, "Invloed wegdekken op de luchtkwaliteit", IPL-3a, december 2009;
- [14] "Emissiefactoren voor niet-snelwegen (SRM1)", 28-02-2014;
- [15] Deltares en TNO, "Wegdekslijtage ten gevolge van het wegverkeer", mei 2013;
- [16] Deltares en TNO, "Bandenslijtage wegverkeer", mei 2013;
- [17] "Characterization of pavement texture by use of surface profiles – Part 1: Determination of Mean Profile Depth", ISO 13473-1;
- [18] CBS, PBL, Wageningen UR (2012). CO₂-emissie per voertuigkilometer van nieuwe personenauto's, 1998-2011 (indicator 0134, versie 10, 21 september 2012).