

Invloed bermbosschages op zijwind en CO₂ emissie vrachtwagens

ir. Erik de Graaff (M+P)
dr. Gertie Geertsema (KNMI)
prof. dr. ir. Harmen Jonker (TU Delft/Whiffle)
dr. ir. Date Rentema (DAF Trucks)
dr. ir. Paul Fortuin (Rijkswaterstaat)
drs. ing. Christiaan Tollenaar (M+P)

Samenvatting

In het Nederlandse concept klimaatakkoord van 2018 staat voor verkeer en vervoer een reductiedoel van 7,3 Mton CO₂. Dit komt overeen met een reductie ter grootte van de emissie van twee tot drie kolencentrales. Voertuigproducenten en wegbeheerders zoeken naar mogelijkheden om de CO₂ emissie van wegverkeer te reduceren. Soms stuiten ze daarbij op onverwachte kansen. Eén zo'n kans wordt in deze paper beschreven.

In een eerder onderzoeksproject van M+P voor Rijkswaterstaat werd als bijvangst een onverwacht fenomeen waargenomen: Het brandstofverbruik van een vrachtwagen steeg onder invloed van zijwind. Bosschages in de berm langs de weg reduceerden de zijwind en daarmee de stijging van het brandstofverbruik. Bij een zijwind van 5 m/s (windkracht 3 a 4 Bft) werd een stijging van het brandstofverbruik van 16% gemeten. Bermbosschages reduceerden deze verbruiksstijging tot wel 90%. Hoewel dit slechts een éénmalig gevonden effect was, werd al snel duidelijk dat dit fenomeen wel eens veel breder relevant zou kunnen zijn.

Rijkswaterstaat besloot daarom tot een vervolgonderzoek. Met een consortium van M+P, KNMI, TU- Delft/Whiffle en DAF is onderzocht hoe relevant dit fenomeen is voor het hele vrachtwagenpark en een groter deel van het hoofdwegennet. Als case studie is de A2 van Utrecht naar Eindhoven genomen. Op locaties van de A2 zonder bosschages blijkt een reductie van 10% op de jaarlijkse CO₂ emissie mogelijk. Omgerekend betekent dit een potentieel van 0,28 kton/km/jaar.

Met dat resultaat en een areaal van zo'n 10.000 km aan rijks- en provinciale wegen lijkt een totale CO₂ reductie ter grootte van één kolencentrale in het verschiet. Maar dat is wellicht te vroeg gejuicht. Het CO₂ reductiepotentieel is namelijk sterk afhankelijk van lokale windstatistiek, windroosligging van het wegvak, verkeersintensiteit en reeds aanwezige zijwindgeleiders. Daarom is eerst een landelijk opschalingsonderzoek en MKBA (Maatschappelijke Kosten Baten Analyse) nodig.

Steekwoorden: klimaatakkoord, CO₂ reductie, vrachtverkeer, maatregelen, wegbeheerder, berm, bosschages, bomen, geluidschermen

Resume

Influence of road side bushes on the crosswinds and on the CO₂ emission of trucks

In the Dutch draft climate agreement of 2018, a reduction target of 7.3 Mton CO₂ is set for traffic and transport. This corresponds to a reduction of the emission of two to three coal-fired power stations. Vehicle manufacturers and road managers are looking for possibilities to reduce the CO₂ emissions from road traffic. Sometimes they encounter unexpected opportunities. One such opportunity is described in this paper.

In an earlier M+P research project for Rijkswaterstaat, an unexpected by-catch was observed: The fuel consumption of a truck increased under the influence of crosswinds. Woodlands on the roadside reduced the crosswind and therefore the increase of fuel consumption. With a crosswind of 5 m/s (wind force 3 to 4 Bft) an increase in fuel consumption of 16% was measured. Roadside groves reduced this consumption increase by up to 90%. Although this was only a one-off effect, it soon became clear that this phenomenon could be more generally relevant.

Rijkswaterstaat therefore decided to conduct a follow-up study. A consortium of M+P, KNMI, TU-Delft / Whiffle and DAF has investigated how relevant this phenomenon is for the entire truck fleet and a larger part of the main road network. The highway A2 from Utrecht to Eindhoven was taken as a case study. At some locations of the A2 it appears that a reduction of 10% on the annual CO₂ emissions is possible. Converted, this means a potential of 0.28 kton/km/year.

With that result and an area of around 10,000 km of national and provincial roads, a total CO₂ reduction of the size of one coal-fired plant appears to be on the horizon. But that may be too optimistic. The CO₂ reduction potential is strongly dependent on local wind statistics, wind rose location of the road section, traffic intensity and existing crosswind guiders. That is why a nationwide upscaled investigation and SCBA (Social Cost Benefit Analysis) are required first.

1. Inleiding

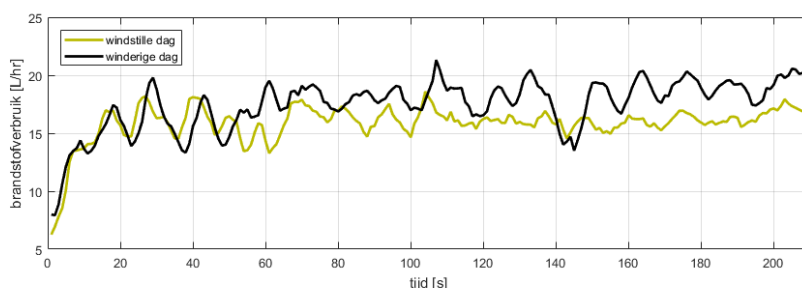
Verkeer en vervoer is met een bijdrage van 20% één van de belangrijkste bronnen van CO₂ emissie. In het Nederlandse concept klimaatakkoord van 2018 staat voor de tafel mobiliteit een reductiedoel van 7,3 Mton CO₂. Dit komt overeen met een reductie van circa 25%. Voertuigproducenten en wegbeheerders zoeken naar mogelijkheden om het brandstofverbruik en daarmee de CO₂ emissie van wegverkeer te reduceren. Soms stuiten ze daarbij op onverwachte kansen.

In een meetproject van M+P, naar de invloed van lage rolweerstand wegdekken op brandstofverbruik van vrachtwagens is het volgende neveneffect gevonden:

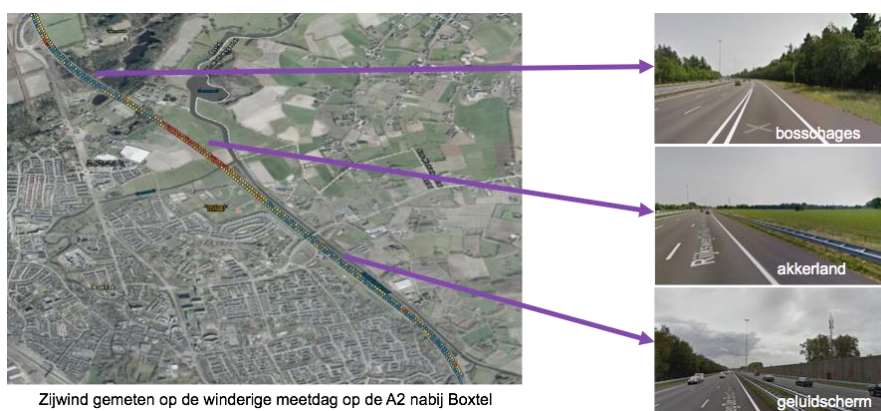
- Zijwind geeft een significante en relevante verhoging op het brandstofverbruik van de meet-vrachtwagen;
- De aanwezigheid van bosschages en geluidschermen langs de snelweg verminderen de zijwind;
- Daarmee verminderen bosschages en schermen de verhoging van het brandstofverbruik door zijwind;

Het effect van zijwind op het brandstofverbruik is significant: Bij de gebruikte vrachtwagen is 16% meerverbruik gemeten bij een zijwind van 5 m/s (windkracht 3 à 4 Bft).

Zijwindgeleiders, zoals bosschages langs de snelweg kunnen de zijwind met meer dan 70% reduceren en het meerverbruik met meer dan 80%. Een voorbeeld van een meetsignaal hierbij is weergegeven in figuur 1. Een voorbeeld van zijwindreductie is weergegeven in figuur 2.



figuur 1 Het brandstofverbruik op een winderige en een windstille dag. Op de winderige dag is alleen de zijwind duidelijk hoger. De overige meetcondities (wegvak, rijrichting, snelheid, temperatuur, langswind etc.) zijn vergelijkbaar



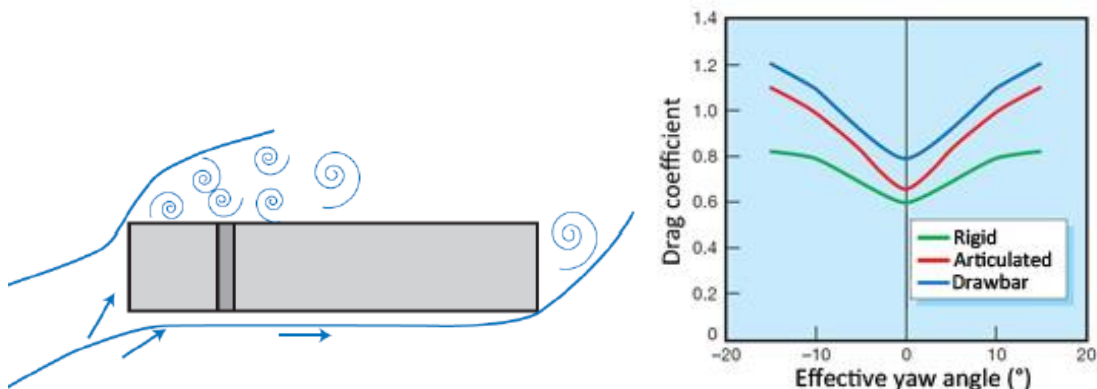
figuur 2 Luchtfoto van de A2 nabij Bostel, met in kleurschakeringen de gemeten zijwind [1] (rood is hoog, blauw is laag). Rechts staan drie locatie impressies (bron: Google streetview). Hoge zijwind wordt gevonden bij het akkerland. Lage zijwind wordt gevonden bij de bosschages en het geluidscherm.

2. Theoretische toetsing

2.1 zijwind effect op de luchtweerstand van het voertuig

Voertuigen moeten tijdens het rijden een aantal krachten overwinnen, waaronder de luchtweerstand en de rolweerstand. Dat kost brandstof en leidt dus tot CO₂ emissie. De luchtweerstand is afhankelijk van de lichtsnelheid en de hoek van aanstroming. Voor het bepalen van de aanstroomhoek moeten de rijwind en de atmosferische wind vectorieel worden opgeteld. Daarbij ontbinden we de atmosferische wind in twee loodrechte componenten, één dwars op de rijrichting en één langs de rijrichting. Bij windstil weer hoeft het voertuig alleen de rijwind te overwinnen en is de aanstroomrichting recht van voren. Bij langswind wordt wel de snelheid van de luchtstroming beïnvloed, maar niet de aanstroomhoek. Bij zijwind levert de combinatie van rijwind en zijwind een bepaalde aanstroomhoek van de lucht. Dit geeft een verstoring effect op de stroming rond het voertuig en levert een verhoging van de weerstand coëfficiënt (zie figuur 3). De luchtweerstand kan, bij grotere aanstroomhoek, enkele tientallen procenten toenemen.

Voor een verkeersweg met één en weer rijdende voertuigen is zijwind belangrijker dan langswind. Bij wind dwars op de weg ondervinden alle voertuigen een zijwind; de ene rijbaan van links en de andere rijbaan van rechts. Bij langswind ondervindt de ene rijbaan een tegenwind en de andere rijbaan een meewind. Afgezien van een klein effect van kwadratische middeling is het effect van langswind daardoor nihil.

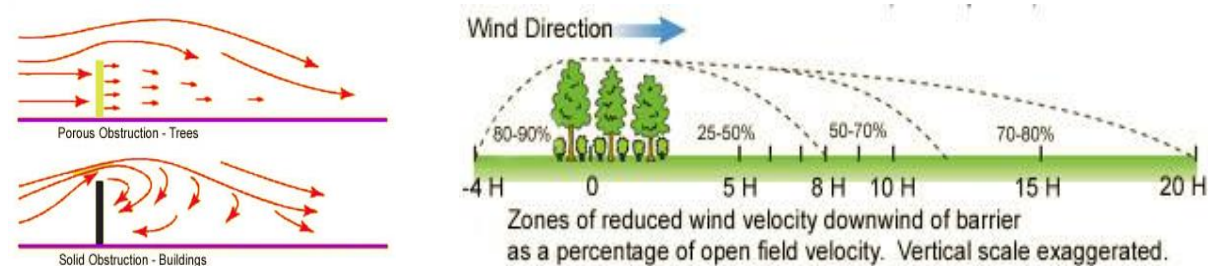


figuur 3 Effect van luchtstroming onder een bepaalde aanstroomhoek op a) de stroming rond het voertuig (links) en b) de weerstand coëfficiënt (rechts) (bron: [3])

2.2 wind reductie door windbrekers

Het kwalitatieve effect van windbrekers is natuurlijk al sinds mensenheugenis bekend, maar kreeg breder wetenschappelijk aandacht na de Dust Bowl in de jaren 1930 in Canada en de Verenigde Staten. Windbrekers werden daarna ingezet om winderosie van de grond tegen te gaan, het effect van koude poolwinden te verminderen en de opbrengst van landbouw te verbeteren.

De hoogte en porositeit van de windbreker zijn belangrijke ontwerpparameters. Goed ontworpen half poreuze windbrekers geven windreducties tot 80% en een windluw gebied tot een afstand van 20 maal de hoogte van de windbreker. Te dichte windbrekers kunnen echter wervels geven die tot negatieve effecten leiden.

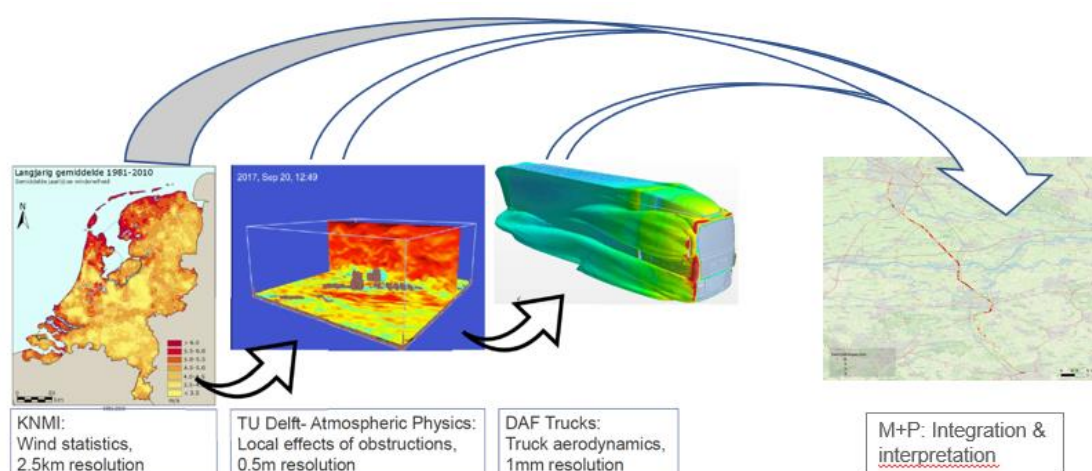


figuur 4 Effect van een windbreker op de luchtstroom stroomafwaarts (bron: [4])

Windbrekers worden wereldwijd ingezet voor verbetering van de landbouw. In het verkeer worden ze af en toe ingezet voor het verminderen van de zijwind in verband met de verkeersveiligheid. Een toepassing voor het verbeteren van het brandstofverbruik is tot nu toe niet bekend. Een expertschatting met de combinatie van bovenstaande gegevens gaf echter aan dat er belangrijk reductiepotentieel verwacht werd.

3. Kennisverdieping

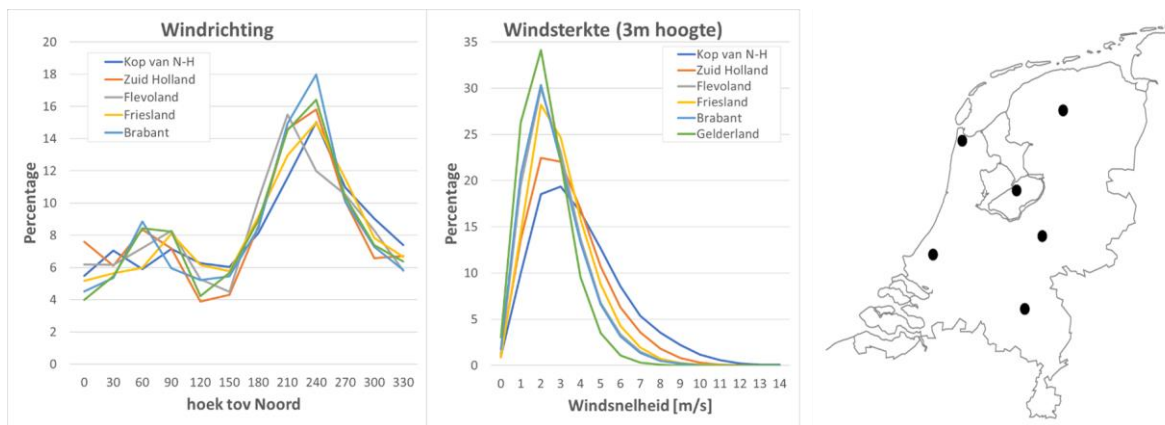
Rijkswaterstaat besloot daarom tot een vervolgonderzoek. Met een consortium van M+P, KNMI, TU- Delft/Whiffle en DAF is onderzocht hoe relevant dit fenomeen is voor het hele vrachtwagenpark en een groter deel van het hoofdwegennet. Daarbij is de “80/20” aanpak gehanteerd, waarbij wordt verondersteld dat met 20% inspanning en budget al 80% van het te bereiken onderzoeksdoel wordt behaald; ofwel een goed, maar begremsd onderzoek. Als case studie is de A2 van Utrecht naar Eindhoven genomen. Het onderzoek werd opgezet en uitgevoerd onder verantwoordelijkheid van M+P. KNMI berekende statistische windgegevens van dit wegvak. TU-Delft/Whiffle deed onderzoek naar het zijwind reducerend effect van verschillende typen bosschages, geluidschermen en andere obstakels. DAF onderzocht het effect van zijwind op het brandstofverbruik van diverse typen vrachtwagens. M+P integreerde al deze gegevens vervolgens in een regionaal GIS-model op basis waarvan de resultaten zijn bepaald.



figuur 5 Samenhang en bijdrage van de instituten

3.1 Windstatistiek

Met het Harmonie windmodel [7] zijn windroostabellen gemaakt met een frequentieverdeling van windsnelheid en windrichting. Met dit model zijn berekeningen uitgevoerd met een roostergrootte van 2,5x2,5 km in het horizontale vlak. In hoogterichting worden 60 luchtlagen onderscheiden, waarvan de laagste op 10 m hoogte ligt. Vanuit de gegevens op 10 m hoogte zijn de windsnelheden omgerekend naar 3 m hoogte, uitgaande van een neutraal logaritmisch profiel. Stabiliteitseffecten van de atmosfeer worden hierbij niet meegenomen, hetgeen een goede eerste benadering is voor langjarige gemiddelden. De resulterende tabellen zijn gebaseerd op een langjarig gemiddelde op een hoogte van 3 meter. Dit is enerzijds gebeurd voor een zestal representatieve punten verdeeld over Nederland en anderzijds het gebied rond de snelweg A2 Utrecht- Eindhoven.



figuur 6 Statistiek van de windrichting en de windsterkte op de zes rasterpunten verdeeld over Nederland

In figuur 6 is een resume van de statistiek van de wind gegeven op de zes rasterpunten verdeeld over Nederland. Hierin is te zien dat de windrichting 210 en 240 (zuidwest) het vaakst voorkomt en dat dit voor alle locaties in Nederland geldt. Op alle locaties komt een windsnelheid van 2 en 3 m/s het meest voor, maar de hogere windsnelheden komen duidelijk vaker voor in het Noordwesten van Nederland dan in het Zuidoosten.

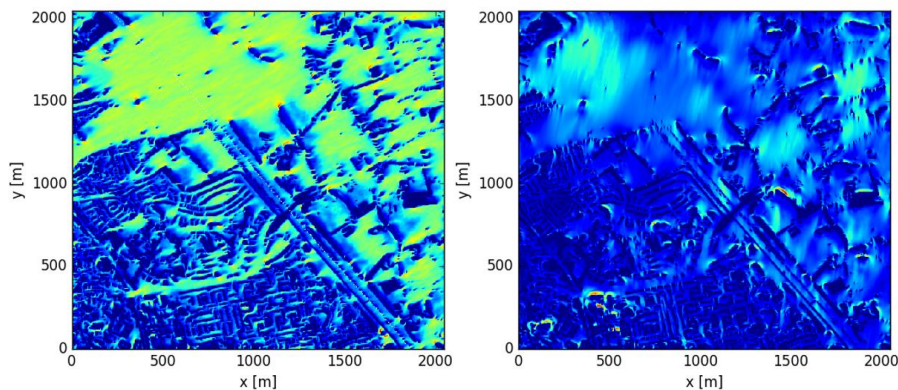
3.2 Effect van obstakels op de lokale wind

Daarnaast is er een gedetailleerdere computersimulatie gemaakt, met een 'Large Eddy Simulation' [8], van de windsituatie op de A2 rond Boxtel voor 19 en 28 september 2016. Op die dagen zijn in het voorgaande project brandstofverbruik- en windmetingen uitgevoerd (zie figuur 1 en figuur 2 en ref [1]). Deze simulatie berekent de lokale windsituatie (op seconde basis en meterniveau) op grond van grootschalige weervoorspellingen (in dit project ERA5 [9]) en lokale terreindetails (in dit project AHN2 [10]). Voor dit project is een model gemaakt van de omgeving van de A2 nabij Boxtel op een horizontaal oppervlak van 2x2 km. Met dit model zijn vervolgens de effecten berekend van virtuele ingrepen in het stroomopwaarts gelegen gebied ten westen van de A2. Achtereenvolgens is gerekend met het plaatsen en verwijderen van bebouwing tot op een afstand van 100 meter van de snelweg, het plaatsen en variëren van massieve geluidschermen en het plaatsen en variëren van vegetatie op 50 meter afstand langs de snelweg.

De belangrijkste bevindingen zijn:

- Half luchtdoorlatende bomenrijen geven een windreductie tot ruim 60% in een gebied tot ca 200 m stroomafwaarts. Dit gebied heeft een rustig stromingsbeeld met weinig turbulentie.

- Massieve schermen geven stroomafwaarts ook een (lokale) windreductie tot zelfs 75%, maar veroorzaken daarnaast veel turbulentie, vooral in het gebied daarachter. Het gebied met gereduceerde wind is een factor 2 a 3 kleiner dan bij poreuze bomenrijen.
- Met de hoogte en luchtdoorlatendheid van bomenrijen en de hoogte van schermen is in de simulaties uitgebreid gevarieerd. Hier komen nog interessante opties uit, voor verdere optimalisatie en fijn-afstemming. Zo lijken bijvoorbeeld “opgesnoeide” of “opgekruide” bomen minder goede of zelfs negatieve resultaten te geven.

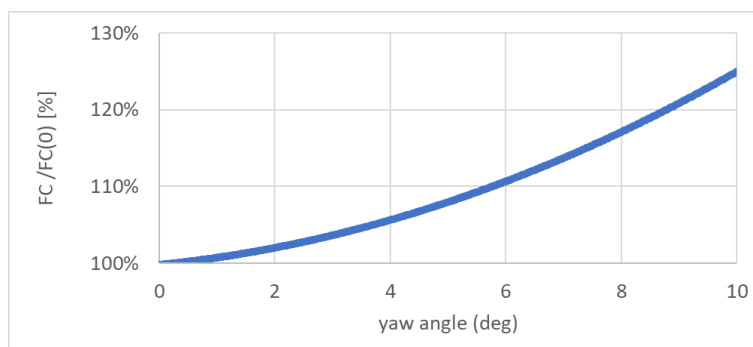


figuur 7 Simulatieresultaten van de lokale windsituatie rond Boxtel voor de winderige(links) en windstille (rechts) dag in September 2016. Rood is hoge windsnelheid en blauw is lage windsnelheid. Waarneemhoogte 3m.

3.3 Zijwind effect op brandstofverbruik vrachtwagens

Vervolgens is de relatie bepaald tussen de aanstroomhoek (yaw angle) en het brandstofmeerverbruik van een aantal vrachtwagens. De spreiding in individuele vrachtwagens is groot, door de spreiding in cabines, laadbakken, stroomlijn verbeterende maatregelen (zoals dakspoilers, zijspoilers), beladingsvormen, gewichten, as-configuraties en dergelijken. In figuur 8 is een indicatieve relatie gegeven, typisch voor het gemiddelde van een aantal veelvoorkomende voertuigconfiguraties van het huidige wagenpark.

Deze relatie is opgesteld voor doorsnee Nederlandse snelwegcondities (rijnsnelheid 84 km/h en vlakke weg) en houdt rekening met het aandeel van de luchtweerstand in de totale voertuigweerstand en met de gevoeligheid van de luchtweerstand voor de aanstroomhoek. De relatie geeft het percentage méérverbruik. Het 100% niveau van het brandstofverbruik én de berekende curve zijn afgestemd op de gemiddelde vrachtwagenvloot, zoals die op de A2 rijdt.



figuur 8 Geschatte effect van de specifieke aanstroomhoek (yaw angle) op het gemiddelde brandstofverbruik van verscheidene vrachtwagenconfiguraties met verscheidene beladingsgraden.

4. Case studie A2

Voor de snelweg A2 tussen Utrecht en Eindhoven is een case studie uitgevoerd naar het potentieel effect van zijwindgeleiders op de CO₂ emissie van het vrachtverkeer op dit wegvak.

Daartoe zijn de inzichten uit hoofdstuk 3 verwerkt in een GIS model. Daarbij is de A2 opgedeeld in 100 meter vakken. Van ieder 100 meter vak zijn de locatie en windroosligging geprojecteerd op de grid met windstatistieken uit Harmonie. Na interpolatie tussen de dichtsbijgelegen Harmonie punten is de windstatistiek per 100 m vak bepaald en ontbonden in een zijwind- en een langswindstatistiek. De langswind component is in dit stadium verwaarloosd en er is verder gerekend met alleen de zijwind component.

Vervolgens is het effect van zijwindgeleiders op de zijwindstatistiek berekend. Daarbij zijn drie varianten doorgerekend:

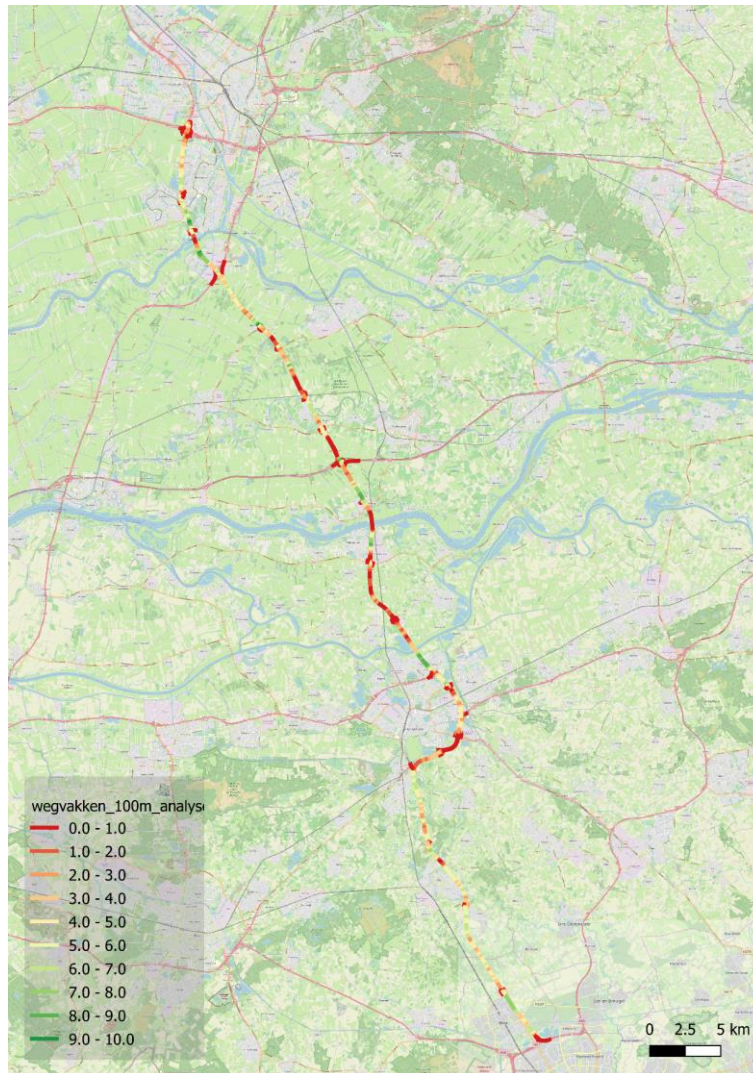
- 1 Huidige situatie;
- 2 Nul-variant, met alle zijwindgeleiders verwijderd;
- 3 Maximum-variant, met toepassing van maximale zijwindgeleiding op het hele traject.

Voor de eerst variant is de huidige situatie in kaart gebracht van de potentiële zijwindgeleiders langs de A2, gemiddeld per 100 meter vak. De luchtdoorlatendheid, de afstand tot de weg en de hoogte zijn meegewogen in een schatting van de effectieve zijwindreductie tussen 0 en 75%. Daarbij is verondersteld dat deze reductie onafhankelijk is van de windsnelheid. Dit is een eerste orde benadering, want in werkelijkheid zijn er kwadratische effecten, die in dit stadium echter nog verwaarloosd zijn. Voor de nul-variant zijn alle zijwindgeleiders uit het model verwijderd. Voor de maximum variant is verondersteld dat er op ieder wegsegment en bij iedere windsnelheid een zijwindreductie van 75% wordt bereikt. De resulterende (gereduceerde) zijwind statistiek per 100 meter vak is vervolgens omgerekend naar een statistiek van voertuig-aanstroombuurt, met de aanname dat de rijwind constant 84 km/h is.

Deze aanstroombuurtstatistiek is per 100 meter vak omgerekend naar een statistiek van brandstofmeerverbruik. Hiertoe is de brandstofmeerverbruik curve bepaald voor een gewogen gemiddelde vrachtwagen. Deze gemiddelde vrachtwagen is bepaald aan de hand van statistieken over voertuigtypen, brandstofverbruik en beladingsgraad. Tenslotte is per 100 m vak het brandstofmeerverbruik voor de drie varianten bepaald aan de hand van verkeersintensiteiten. Enkele van de berekeningsresultaten zijn weergegeven in figuur 9 en tabel I.

tabel I Inschatting effect van zijwindgeleiding op jaarlijkse CO₂-uitstoot voor vrachtwagens op het wegvak van 75 km van de A2 tussen Utrecht en Eindhoven

	jaarlijkse CO ₂ -uitstoot [kton]	verschil met 1)	
		[%]	[kton]
1. Nulvariant: CO ₂ uitstoot, gecorrigeerd voor zijwind zonder zijwindgeleiding (= referentie voor deze studie)	188,3	0	0
2. huidige situatie mbt zijwindgeleiding	181,9	-3,4	-6,4
3. maximum variant	173,6	-7,8	-14,7
4. resterend reductie potentieel (variant 3 - 2)	-8,3	-4,4	-



figuur 9 Huidige situatie brandstofreductie (in procenten) door zijwindgeleiding op de A2

Uit tabel I blijkt dat voor de case studie van de A2 tussen Utrecht en Eindhoven (75 km) een reductiepotentieel berekend wordt van gemiddeld 7,8%, waarvan reeds 3,4% is gerealiseerd middels bestaande zijwindgeleiders. Het resterende reductiepotentieel in de CO₂ emissie is 8,3 kton/jaar of 0,11 kton CO₂/km/jaar.

Lokaal op de A2 zijn grotere effecten berekend. De hoogst mogelijke CO₂-reductie kan worden behaald als er wordt overgegaan van een vrije wind situatie in de polder naar een situatie met 75% zijwindgeleiding. Om het effect van deze maatregel op de CO₂-reductie en op de kosten voor maatregelen beter in kaart te brengen, wordt hier gekeken naar 1 kilometer wegvaklengte van de A2 in de polder bij Beesd. De totale jaarlijkse CO₂-uitstoot (gecorrigeerd voor zijwind) voor vrachtwagens voor dit wegvak van 1 km lengte, in beide rijrichtingen komt uit op circa 2,8 kton CO₂/km/jaar. Het reductiepotentieel, bij 75% zijwindgeleiding is 0,28 kton CO₂/km/jaar (ca 10%).

Bij deze case studie is uitgegaan van de A2 tussen Utrecht en Eindhoven. Om het effect elders in Nederland te bepalen is een opschalingsonderzoek nodig. De lokale effecten zijn afhankelijk van de windstatistiek, de windroosligging van het wegvak en de verkeersintensiteiten. Al deze factoren kunnen leiden tot groter, maar ook kleiner besparingspotentieel dan hier op de A2.

5. Conclusies en bespreking

Vanuit een meetproject is gevonden dat het brandstofverbruik van een vrachtwagen stijgt onder invloed van zijwind. Bermbosschages langs de snelweg reduceren de zijwind op de weg en daarmee het brandstofverbruik en de CO₂ emissie van de vrachtwagen. Het gemeten meerverbruik is 16% bij 5 m/s zijwind (3 a 4 Bft). Bermbosschages geven een reductie tot 80% op de zijwind en tot 90% op het meerverbruik.

Aan de hand van model onderzoek is bevestigd dat dit gemeten effect een fysisch verklaarbaar en reproduceerbaar fenomeen is. De grootte van het meerverbruik en de grootte van het reductiepotentieel, dat is gevonden in de modelstudie, komt goed overeen met het effect dat is gevonden tijdens de metingen. Het CO₂ reductiepotentieel voor een specifiek wegvak is sterk afhankelijk van de lokale windstatistiek, de windroosligging van het wegvak, de verkeersintensiteit, het type vrachtwagens en de reeds aanwezige zijwindgeleiders. Aan de hand van een case studie in het midden van Nederland, op 75 km van de snelweg A2 tussen Utrecht en Eindhoven, wordt een CO₂ reductie potentieel berekend van gemiddeld 0,11 en maximaal 0,28 kton CO₂/km/jaar. Met een CO₂ emissieprijs van 90 euro/ton [11] betekent dit een opbrengstpotentieel van gemiddeld 10 euro per meter per jaar voor dit wegvak. Verwacht wordt dat het effect in winderige kuststreken groter is en windluwer achterland lager.

Deze studie is opgezet volgens de 80/20 aanpak met als doel een eerste redelijke inschatting te doen tegen beperkte kosten en doorlooptijd. Dit leidt tot een eerste gulden schot voor het effect van zijwind en zijwindgeleiders. Gezien het positieve resultaat lijkt een verdiepingsslag en opschalingsonderzoek voor de hand te liggen. Het onderzoeksconsortium heeft hiervoor diverse aanbevelingen gedaan. Belangrijke onderdelen zijn: een Maatschappelijke Kosten Baten Analyse (MKBA), een landelijk opschalingsonderzoek en het uitbreiden van het onderzoek met personenauto's en bestelwagens. Aan de batenkant zijn er naast de monetaire baten vanwege brandstofbesparing ook de baten voor luchtkwaliteit (CO₂, maar ook stikstof e.d.). Aan de kostenkant zijn er de aanplant en onderhoud van struiken en mogelijk aankoop van grond. Maar er zijn ook eenvoudiger kansen, zoals het inboeken van de baten van reeds bestaande zijwindgeleiders of het herzien van snoei beleid van bestaande bosschages (bijvoorbeeld verbod op opkruinen).

6. Literatuur

- [1] E. de Graaff, E. van Gils, "Invloed van wegdek type op het brandstofverbruik van vrachtwagens", M+P.RWVL.16.07.1, 24-1-2017;
- [2] E. de Graaff, C. Tollenaar, E. van Gils, "Zijwind-effect op de CO₂ emissie van vrachtverkeer", M+P.RWVL.17.02.1, 31-5-2019;
- [3] <http://www.part20.eu/nl/achtergrond/aerodynamica/>
- [4] www.fao.org
- [5] www.worldagroforestry.org
- [6] <https://www.co2emissiefactoren.nl/>
- [7] G.T. Geertsema en H.W. van den Brink, "Windkaart van Nederland op 100 meter hoogte", KNMI Technisch rapport TR351, de Bilt, 2014, <http://bibliotheek.knmi.nl/knmipubTR/TR351.pdf>
- [8] J. Schalkwijk, H.J.J. Jonker, A.P. Siebesma, F. Bosveld, "A Year-Long Large-Eddy Simulation of the Weather over Cabauw: an Overview", Monthly Weather Review 143 (2015) 828-844
- [9] <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>

- [10] <https://www.ahn.nl>
- [11] Ricardo-AEA/R/ED57769, “Update of the Handbook on External Costs of Transport”, januari 2014
- [12] R. Willems, H. Molnár-in 't Veld, N. Ligterink, “Bottom-up berekening CO2vrachtwagens en trekkers”, CBS rapport , 2014
- [13] M. Otten, M 't Hoen, E den Boer, “STREAM Goederenvervoer 2016; Emissies van modaliteiten in het goederenvervoer – Versie 2”, CE Delft Publicatienummer: 17.4H29.10
- [14] G. van Blokland, J. Hooghwerff, C. Tollenaar, “Invloed schermen op de luchtkwaliteit; Eindrapport onderzoek naar de werking van (geluid)schermen op de luchtkwaliteit langs snelwegen”, Rijkswaterstaat DVS, rapportnummer IPL-1a, december 2009