

Memo

Aan RIVM/AERIUS

Van

Onderwerp Brandstofverbruik mobiele werktuigen voor toekomstige jaren

www.tno.nl
emiel.vaneijk@tno.nl
+31615216586

Datum
19 juli 2024
Onze referentie
060.60394/02

1. Inleiding

Voor berekeningen aan mobiele werktuigen in AERIUS Calculator is het berekening brandstofverbruik,¹ als deze brandstofgegevens ontbreken, onderdeel van de modelinvoer. Dit brandstofverbruik kan geschat worden met een [spreadsheet](#), opgesteld door TNO. Het brandstofverbruik is hierin afhankelijk van het bouwjaar, van de motor. De huidige spreadsheet voorziet niet in de jaren na 2021. TNO heeft daarom de spreadsheet uitgebreid tot 2040. Deze notitie geeft een beknopte beschrijving van de daarbij gehanteerde methode.

2. Achtergrond

Het brandstofverbruik is onder andere afhankelijk van de motorefficiëntie, bij een gegeven, optimale motorbelasting. Bij lagere motorbelasting is de gerealiseerde motorefficiëntie lager. De motorefficiëntie is de hoeveelheid verbruikte brandstof per hoeveelheid omgezette energie. Brandstofverbruik wordt lager richting de toekomst ten gevolge van autonome ontwikkelingen. Geregeld wordt de vraag gesteld hoe de motorefficiëntie zich zal ontwikkelen richting 2040 en zelfs 2050. In 2019² kwam uit analyse dat de motorefficiëntie met ongeveer 1% per jaar verbetert, waarvan in de praktijk ongeveer 0,5% per jaar overblijft door de toename van het motorvermogen (bij gelijke inzet) en daarmee de lagere belasting van de motoren. De inschatting is gecombineerd met eerdere studies naar brandstofverbruik als functie van motorgrootte en motorbelasting en daarom is het referentiejaar 2010.^{3,4,5,6} Het extrapoleren van de gevonden trend naar 2050 zal leiden tot onrealistisch goede motorefficiëntie.

In laboratoriumomstandigheden, zoals de wettelijke testen, is de prestatie van motoren over het algemeen beter dan tijdens praktijk inzet. Dat komt deels omdat in de normale praktijk meer energieverbruikers, zoals elektronica, koeling, en pompen meedraaien op de motor. Dat geeft een energieverlies in de praktijk in de orde van 3%-6% van het maximaal vermogen van de motor. Deze afhankelijkheden zijn uitgewerkt in een formule, die zowel met de motorgrootte (grotere motoren zijn efficiënter) en met het bouwjaar rekening houdt, op basis van een Willans lijn.³ Deze lijn is het lineaire verband tussen het brandstofverbruik en het geleverde vermogen. Dat brandstofverbruik is groter dan nul als er geen vermogen geleverd wordt (stationair draaien). Deze lijn verandert met de jaren. De richtingscoëfficiënt wordt lager (minder brandstof per kWh arbeid) en ook de offset wordt lager. De richtingscoëfficiënt daalt daarin met 1% per jaar, en beperktere verbetering van de offset (d.w.z.

¹ AUB (AdBlue verbruik, Uren, en Brandstofverbruik): een robuuste schatting van NOx en NH3 uitstoot van mobiele werktuigen, TNO rapport 2021 R12305.

² TNO Kennisinbreng Mobiliteit voor Klimaat- en Energieverkenning (KEV) 2019. NRMM Binnenvaart en Zeevaart, TNO rapport 2019 R12134.

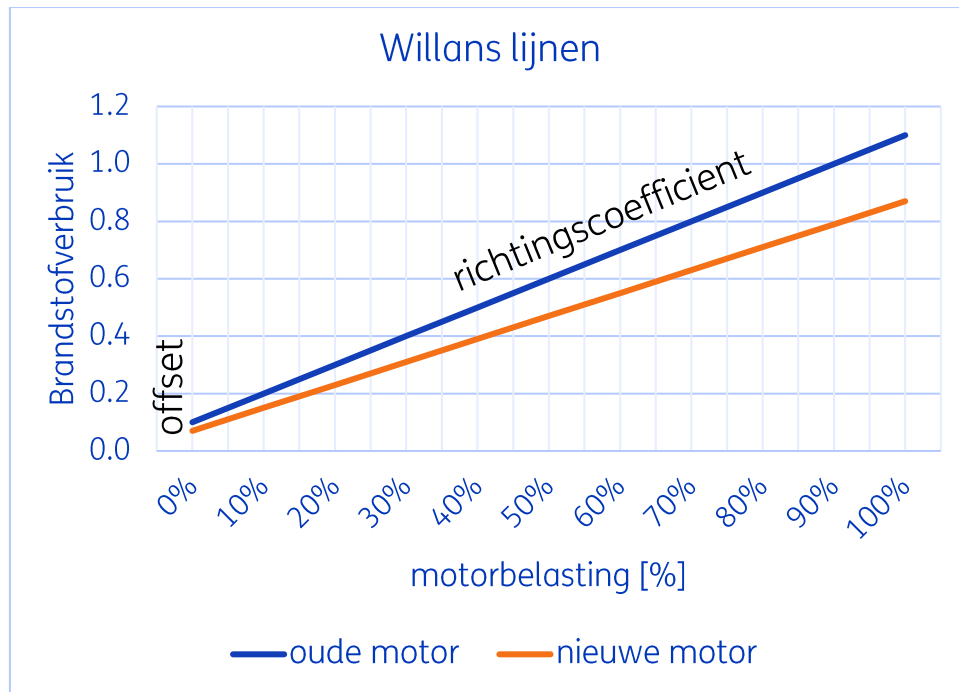
³ Onderbouwing AERIUS emissiefactoren voor wegverkeer, mobiele werktuigen, binnenvaart en zeevaart, TNO rapport 2020 R11528.

⁴ Correlation factors between European and World harmonised test cycles for heavy-duty engines, TNO rapport 2008 R03854

⁵ Supporting analysis on real-world light-duty vehicle CO2-emissions, TNO rapport 2016 R10419

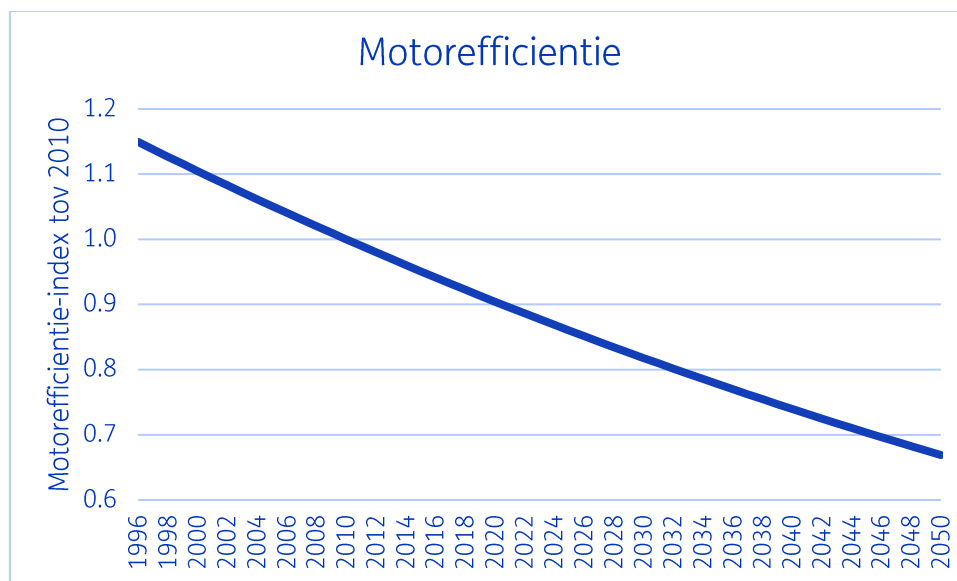
⁶ Dutch CO2 emission factors for road vehicles, TNO rapport 2016 R10449.

motorverliezen) met 0,5% per jaar. Deze combinatie match dan goed met het verschil tussen test en praktijk, in combinatie met het toegenomen motorvermogen voor een aantal gangbare toepassingen.



Figuur 1 Willans lijnen voor een oude en nieuwe motor waar de richtingscoëfficiënt daalt, en de offset (brandstofverbruik bij 0% motorbelasting) daalt. De verandering van deze richtingscoëfficiënt in de loop van de tijd is de maat van efficiëntieverbetering.

De jaarafhankelijkheid zit verwerkt in de motorefficiëntie factor $Eff[yr]$ in de formules, als functie van het bouwjaar van de motor. De daling van de richtingscoëfficiënt in de loop van de jaren, zeker voorbij 2025, is centrale vraag en aanpassing die in deze notitie beschreven wordt. De motoren uit 2010 zijn de referentiesituatie en $Eff[2010] = 1.0$.



Figuur 2 De extrapolatie van de trend (geïndexeerd op 2010) tot 2022, zoals toegepast in de huidige schatting voor het brandstofverbruik. Wanneer deze doorgetrokken wordt tot 2050 geeft onrealistische hoge motorefficiëntie in de toekomst.

De uiteindelijke formule⁷ voor mobiele machines (NRMM) voor brandstofverbruik (FC) is:

$$FC[\text{lit/hr}] = (3600/(3.1 \cdot 840))^* \\ ((0.5 \cdot (1 + \text{Eff}[\text{yr}])) \cdot (0.4 + 0.0025 \cdot P_{\text{rated}}[\text{kW}]) \\ + 0.2 \cdot \text{Eff}[\text{yr}] \cdot (1 + \exp(-P_{\text{rated}}[\text{kW}]/5)) \cdot P_{\text{rated}}[\text{kW}] \cdot \text{load}[\%])$$

In de formule:

- Het laatste deel, de derde regel, is de richtingscoëfficiënt (RC) van de Willans lijn, en middelste deel, de tweede regel, zijn de verliezen.
- Waarin Eff[yr] de verbetering van de efficiëntie Eff[2010] = 1, en 1% verslechtering per voorgaand jaar, en verbetering per toekomstig jaar. Voor de motorverliezen, in de tweede regel, is dat "0.5*(1+Eff)".
- De verliezen (in 2010) zijn een vaste 0,4 [kW] + 2,5% per P_{rated}[kW] gefit aan motoren van 50 kW tot 300 kW uit het TNO DCM programma voor de overheid.
- De efficiëntie van grotere motoren is gefit met een exponent: 1+exp(-P_{rated}[kW]/5), vooral om onder de 20 kW af te laten lopen (bij NRMM). Voor de referentie in 2010 is de richtingscoëfficiënt van de Willans lijn: CO₂ emissiefactor is 720 g/kWh (wat leidt tot een simpele 0.2 g/s CO₂ per 1 kW vermogen) en 680 g/kWh voor 2015 (let wel B7 marktdiesel:⁸ dus 43 MJ/kg stookwaarde (LHV)).
- Dichtheid van diesel 840 g/l, en CO₂/kg conversie 3100 g/kg, omdat de diesel 85% koolstof, C, bevat die omgezet wordt naar CO₂ waarvan het molair gewicht 44 gram is, waarvan 12 gram koolstof.

De aanname is dat NRMM niet geoptimaliseerd zijn voor een specifiek motorbelastingpunt (koppel en toerental), zoals dat wel gezien wordt voor vrachtwagens (snelweginzet) en schepen (schroefkromme). Bij dergelijke optimalisaties kunnen motoren een paar procent efficiënter draaien in die belastingpunten, ten koste van een hoger brandstofverbruik bij andere inzet.

⁷ AUB (AdBlue verbruik, Uren, en Brandstofverbruik): een robuuste schatting van NO_x en NH₃ uitstoot van mobiele werktuigen, TNO rapport 2021 R12305

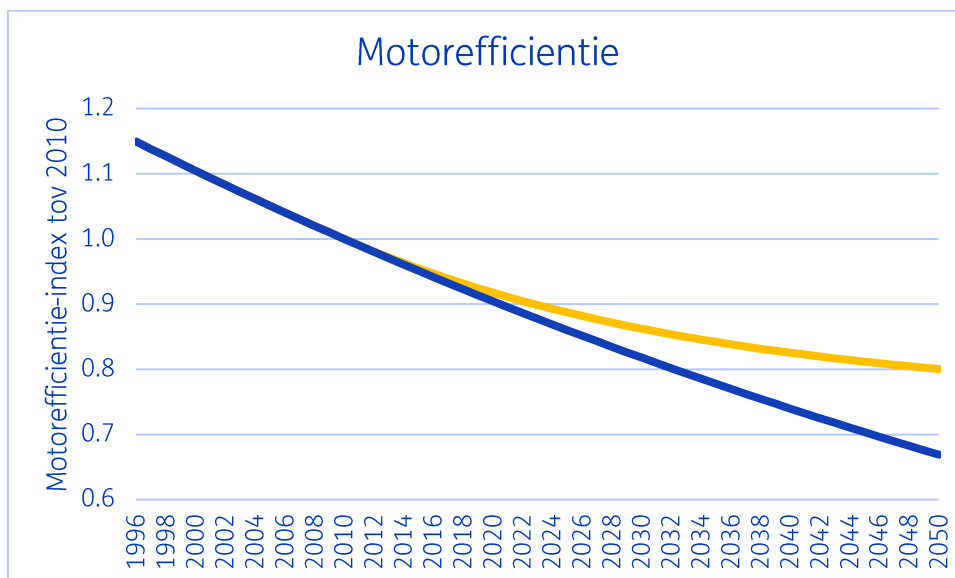
⁸ Update of the Netherlands list of fuels in 2021, TNO rapport 2021 R11314

Er is geen duidelijke fysische begrenzing aan de motorefficiëntie. De literatuur geeft aan dat de toenemende compressieverhouding en temperatuur de efficiëntie sturen,⁹ en dat meervoudige injectie ook nog wat helpt, en dat voor “gewone” (snellopende) dieselmotoren 48%-50% optimale efficiëntie, bij de conversie van lage stookwaarde van de brandstof (MJ/kg) naar mechanische arbeid van de motor, ofwel richtingscoëfficiënt, zeker haalbaar lijkt. Dat is dus relatief nog 22% te gaan ten opzichte van de 40% optimale motorefficiëntie in de praktijk voor 2015. De toename van efficiëntie van 1% per jaar zal afvlakken naar een uiteindelijke waarde die 75% van het brandstofverbruik per kWh is voor motoren met het bouwjaar 2010, ofwel optimaal 540 gram CO₂ en 174 gram brandstof per kWh.

Op basis hiervan wordt Eff[yr] voor yr > 2010 aangepast voor extrapolaties naar 2040:

$$\text{Eff}[\text{yr}] = 0.25 \cdot \exp(-0.04 \cdot (\text{yr} - 2010)) + 0.75$$

Dat zou dan neerkomen op onderstaande aanpassing van Eff[yr]:



Figuur 3 De oude (blauw) en de nieuwe (oranje) inschatting van de motorefficiëntieverbetering over de jaren. De oranje lijn convergeert naar 0.75. (75% van het brandstofverbruik in 2010).

Omdat deze formule vanaf het referentiejaar 2010 wordt toegepast, voor een continu verloop, zijn de waarden vanaf 2011 aangepast.

De waarde van 35% motorbelasting in de rekensheet is een generieke aanname voor alle machines. Er zijn zeer grote verschillen in motorbelasting in de praktijk, tussen typische waarden van 15% tot 50%. Het is daarom belangrijk deze gegevens voor specifieke machines en toepassingen te verzamelen.

⁹ Internal combustion engine fundamentals, John B. Heywood