Inventarisatie van de grondgebonden emissies op luchthavens

TNO Intern › TNO 2023 R12667
21 december 2023

Energy & Materials Transition
www.tno.nl
+31 88 866 42 56
info@tno.nl

TNO 2023 R12667 – 21 december 2023

Inventarisatie van de grondgebonden emissies op luchthavens

Auteurs: Stijn Dellaert, Luuk Meijer, Pim van Mensch, Bastiaan Jonkheid, Bart Jansen

Rubricering rapport: TNO Intern
Titel: TNO Intern
Rapporttekst: TNO Intern
Bijlagen: TNO Intern
Aantal bijlagen: 2
Opdrachtgever: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Projectnummer: 060.54972

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

© 2023 TNO

Samenvatting

Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) heeft in 2023 verschillende onderzoeken laten uitvoeren naar de impact die Nederlandse luchthavens hebben op luchtkwaliteit. In deze studie is de bijdrage van een specifieke groep emissiebronnen op Nederlandse luchthavens onderzocht, namelijk het grondgebonden materieel. Daarbij is een inventarisatie gemaakt van de emissiebijdrage van het grondmateriaal en hoe deze emissiebronnen verduurzaamd kunnen worden.

De Nederlandse Emissieregistratie (ER) rapporteert jaarlijks de emissietotalen van grondgebonden materieel per luchthaven. Voor Schiphol worden deze totalen aangeleverd door KLM Equipment Services. Voor de andere luchthavens worden de emissietotalen van Schiphol geschaald op basis van de activiteit op de desbetreffende luchthaven. In deze studie wordt een alternatieve rekenmethode getoetst om de emissies van grondmaterieel op deze luchthavens in kaart te brengen.

In dit onderzoek is een uitvraag gedaan bij de vijf grootste luchthavens van Nederland naar de samenstelling en inzet van hun grondgebonden materieel. Twee luchthavens hebben gedetailleerde informatie over de samenstelling en inzet van het materieelpark aangeleverd en twee andere luchthavens alleen brandstofgegevens. Van luchthaven Schiphol zijn geen aanvullende gegevens verkregen, waardoor deze luchthaven, met veruit het grootste grondmaterieelpark, ontbreekt in deze studie.

Op basis van de gedetailleerde gegevens voor luchthavens Groningen Airport Eelde (GAE) en Maastricht Aachen Airport (MAA) is een brandstof- en emissieberekening uitgevoerd met het EMMA-emissiemodel van TNO. De resultaten van deze berekening zijn vergeleken met de huidige rapportage door de Emissieregistratie, en met de brandstofopgave van de luchthavens. Voor luchthaven MAA ligt het berekende brandstoftotaal dicht bij de opgave van de luchthaven zelf en tevens dicht bij de waarde die wordt gerapporteerd door de Emissieregistratie. Dit suggereert dat zowel de Emissieregistratie methodiek als de berekening met het EMMA-model een representatief resultaat opleveren voor deze luchthaven. Voor luchthaven GAE ligt de brandstofopgave door de luchthaven circa 2 keer lager dan de berekening met het EMMA-model en zelfs 5 maal lager dan de rapportage van de Emissieregistratie. In beide gevallen zou een vergelijking over meerdere jaren een betere indicatie kunnen geven of, en hoe, de gebruikte methoden zouden moeten worden aangepast om een representatieve emissieschatting te geven.

Omdat de emissies van onder andere stikstofoxiden (NO_x), fijnstof (PM), koolwaterstoffen (THC) en koolmonoxide (CO) sterk afhangen van de precieze samenstelling en inzet van het materieelpark, wijken sommige emissiewaarden meer af dan de brandstoftotalen bij vergelijking tussen de huidige emissieberekening in de Emissieregistratie en de berekeningen met het EMMA-model. In aanvulling op de emissies van CO_2, NO_x, CO, PM, NH_3, N_2O en SO_2 zijn de emissies van koolwaterstoffen (THC; total hydrocarbons) waar mogelijk uitgesplitst tot individuele chemische componenten, waaronder PAKs (Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen) en enkele andere stoffen van de ZZS-lijst (Zeer Zorgwekkende Stoffen). Om de mogelijke gezondheidseffecten in te schatten, moeten naast de jaarlijkse emissies

ook lokale concentraties in de buitenlucht en daarmee de blootstelling worden bepaald. Beide aspecten waren geen onderdeel van deze studie.

Het is de verwachting dat de berekening met het EMMA-model op basis van gegevens over het daadwerkelijke materieelpark betrouwbaardere resultaten oplevert dan de huidige methode in de Emissieregistratie, omdat deze aanpak beter rekening houdt met aspecten die het meest bepalend zijn voor de emissies, zoals machinekenmerken en inzet. Deze methode is daarmee geschikter voor het monitoren van eventuele emissiereductie door vernieuwing van materieel of andere maatregelen, wat met de huidige methode zeer beperkt mogelijk is. De vergelijking met de door de luchthavens aangeleverde brandstoftotalen toont aan dat er alsnog uitgegaan moet worden van een forse onzekerheidsbandbreedte. De methode is sterk afhankelijk van een nauwkeurige en volledige gegevensaanlevering door de luchthavens. Daarom is het aan te bevelen dat de Nederlandse luchthavens jaarlijks een inventarisatie van het grondmaterieelpark en de inzet hiervan opmaken, zodat de emissies en toekomstige emissiereducties beter kunnen worden gemonitord. Aanvullende praktijkmetingen van emissies van verschillende typen grondgebonden machines kunnen deze methode verder ondersteunen.

Tot slot zijn in deze studie verschillende verduurzamingsopties in kaart gebracht die de milieu-impact van grondmaterieel kunnen verminderen. Het verminderen van met name emissies van NO_x en PM kan middels het vervangen van machines door varianten die voldoen aan de meest recente Europese Emissienorm voor mobiele werktuigen (STAGE-V), of het retrofitten van uitlaatgasnabehandelingssystemen van machines. Om ook CO_2-emissie te reduceren en volledig emissievrij te worden, zijn er verschillende opties om te elektrificeren: met een vaste netaansluiting of met een (verwisselbaar) accupakket. Bij een stapsgewijze overgang naar elektrisch grondmaterieel is het van belang om rekening te houden met de eigenschappen (m.n. motorvermogen) en inzet van de machines.

Inhoudsopgave

Samenvatting 4
Inhoudsopgave 3
1 Inleiding 5
2 Rekenmethode 6
2.1 Huidige rekenmethode in de Emissieregistratie 6
2.2 Huidige emissietotalen Emissieregistratie 7
2.3 Onzekerheidsinschatting 8
2.4 Voorgestelde rekenmethode 8
3 Dataverzameling 10
3.1 Introductie uitvraag 10
3.2 Verkregen data 10
3.2.1 Groningen Airport Eelde 10
3.2.2 Maastricht Aachen Airport 11
3.2.3 Rotterdam The Hague Airport 11
3.2.4 Eindhoven Airport 11
3.2.5 Schiphol 11
3.3 Aanvulling en bewerking 12
3.3.1 Groningen Airport Eelde 12
3.3.2 Maastricht Aachen Airport 12
4 Resultaten 13
4.1 Brandstofinzet 13
4.1.1 Rotterdam The Hague Airport (RTHA) 14
4.1.2 Eindhoven Airport 15
4.1.3 Groningen Airport Eelde 16
4.1.4 Maastricht Aachen Airport 17
4.2 Emissies hoofdcomponenten 18
4.2.1 Groningen Airport Eelde 18
4.2.2 Maastricht Aachen Airport 18
4.3 Emissies VOS, PAKs en ZZS 19
4.4 Grootste emissiebronnen binnen het grondmaterieel 20
4.4.1 Groningen Airport Eelde 20
4.4.2 Maastricht Aachen Airport 21
5 Verduurzamingspotentieel 23
5.1 Beschrijving verduurzamingsopties 23
5.2 Vervangen oudere (diesel)machines door Stage V 23
5.3 Opties voor retrofitting 25
5.4 Alle machines vervangen door uitstootvrije machines 25
5.5 Inschatting beperkte elektrificatie 26
5.6 HVO 27
6 Conclusies 28
7 Ondertekening 30
8 Literatuur 31

Bijlagen

Bijlage A: Overzicht emissies grondmaterieel 35
Bijlage B: Tabellen ZZS – GAE en MAA 38

1 Inleiding

Er is een toenemende vraag naar goed onderbouwde cijfers en inzichten in de impact die Nederlandse luchthavens hebben op de luchtkwaliteit en het klimaat. Naast de vliegtuigen zelf zijn er verschillende andere emissiebronnen aanwezig op de luchthavens die bijdragen aan deze impact. In deze studie wordt gekeken naar de bijdrage van het grondgebonden materieel, welke o.a. laadwagens, trekkers, de-icing machines, ground power units (GPU's), air start units (ASU's), brandstof- en brandweerwagens, verrijdbare trappen en liften omvat. Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) heeft TNO gevraagd in kaart te brengen wat de emissiebijdrage van deze bronnen is en hoe deze emissiebronnen verduurzaamd kunnen worden.

Eén van de doelen van dit onderzoek is om de uitstoot van het grondgebonden materieelpark zo goed als mogelijk in kaart te brengen. Dit is gedaan door uitvraag te doen bij de vijf grootste luchthavens van Nederland naar de samenstelling en inzet van hun grondgebonden materieelpark en deze gegevens te gebruiken in het EMMA-rekenmodel[1] van TNO. Er is gekeken naar de emissies van zowel klimaatrelevante stoffen als luchtverontreinigende stoffen. In aanvulling op de emissies van CO_2, NO_x, CO, PM, NH_3, N_2O en SO_2 zijn de emissies van koolwaterstoffen (THC) waar mogelijk verder uitgesplitst en uitgebreid tot individuele chemische componenten, waaronder verschillende Vluchtige Organische Stoffen (VOS), PAKs (Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen) en enkele andere stoffen van de ZZS-lijst (Zeer Zorgwekkende Stoffen). We toetsen de voorgestelde methode door een vergelijking met de huidige emissiecijfers die worden gepubliceerd door de Nederlandse Emissieregistratie, en een vergelijking op brandstofniveau met door luchthavens aangeleverde brandstoftotalen.

Naast beter inzicht in de huidige emissies is het voor IenW ook belangrijk om inzicht te krijgen in de mogelijkheden tot verduurzaming. Daarom wordt in dit rapport ook ingegaan op mogelijke verduurzamingsopties voor het grondmaterieel en het verwachte effect hiervan.

[1] EMMA: Emissiemodel Mobiele Machines gebaseerd op machineverkopen in combinatie met brandstof Afzet

2 Rekenmethode

2.1 Huidige rekenmethode in de Emissieregistratie

De emissies van grondgebonden materieel (ook wel Ground Support Equipment, GSE, genoemd) worden jaarlijks berekend binnen de Nederlandse Emissieregistratie (ER) voor de grote (Amsterdam Schiphol, AMS) en middelgrote luchthavens (Eindhoven Airport (EIN), Groningen Airport Eelde (GAE), Maastricht Aachen Airport (MAA), Rotterdam The Hague Airport (RTHA), en Lelystad) in Nederland. Luchthaven Lelystad is echter geen onderdeel van deze studie. De rekenmethode die wordt gebruik door de Emissieregistratie is beschreven in hoofdstuk 2.4 van Dellaert & Hulskotte (2017) en zal hieronder in het kort worden beschreven.

Voor de luchthaven Schiphol worden jaarlijkse brandstof- en emissietotalen verkregen van KLM Equipment Services (KES) die nagenoeg al het grondmaterieel op Schiphol afdekken (ook grondmaterieel in beheer van andere bedrijven). KES berekent de emissies op basis van tankgegevens en een eigen database van het park aan grondgebonden materieel, waarin kenmerken zoals de milieuklasse (Stageklasse) worden meegenomen. Dit is beschreven in Feldbrugge (2015). Voor de middelgrote luchthavens zijn in het verleden door de Emissieregistratie geen gegevens verzameld over de samenstelling en inzet van het grondmaterieelpark.

Om de brandstofinzet en emissies van grondmaterieel op de middelgrote luchthavens in te schatten, gebruikt de Emissieregistratie de emissietotalen voor het grondmaterieel op Schiphol. Deze emissietotalen voor Schiphol worden omgerekend naar een zogenaamde Implied Emission Factor (IEF), in dit geval door de emissies en brandstofinzet te delen door de totale jaarlijkse 'Maximum Take-Off Weight' (MTOW; maximale gewicht van de vliegtuigen) op de luchthaven Schiphol, voor alle vliegbewegingen met toestellen zwaarder dan 6 ton (zie formule 1). Voor de middelgrote luchthavens in Nederland wordt de hoeveelheid brandstof en emissies per stof (E_{stof}) dan bepaald door de totale MTOW van de vluchten in dat jaar te vermenigvuldigen met de IEF (zie formule 2).

Vergelijking 1: Bepaling IEF voor specifieke stof o.b.v. emissiegegevens Schiphol

$$IEF_{stof} = E_{stof} / \sum_{MTOW>6\ ton} MTOW$$

Vergelijking 2: Bepaling emissies grondmaterieel op middelgrote luchthavens o.b.v. MTOW en IEF

$$E_{stof} = IEF_{stof} \times \sum_{MTOW>6\ ton} MTOW$$

Door een gebrek aan gegevens over het grondmaterieelpark op de middelgrote luchthavens, is de Emissieregistratie afhankelijk van een aantal aannames:

- Het materieelpark van de andere luchthavens is qua samenstelling en leeftijdsverdeling vergelijkbaar met Schiphol;

- De inzet van grondmaterieel op een luchthaven correleert goed met het aantal vluchten (exclusief de kleine vliegtuigen <6 ton) in een bepaald jaar, gewogen naar het gewicht van de vliegtuigen.

De beschreven methode voor de middelgrote luchthavens berust op aannames die door gebrek aan gedetailleerde data niet eerder gevalideerd konden worden. Voor het verbeteren van de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de berekende emissiewaarden voor het materieelpark van de middelgrote luchthavens zijn gedetailleerde gegevens nodig over de samenstelling en inzet van het materieelpark van deze luchthavens.

Tevens is er aan de kant van het ministerie, de Emissieregistratie, en TNO, weinig inzicht in de samenstelling en inzet van het materieelpark op luchthaven Schiphol, alsmede beperkt inzicht in de methode die KES hanteert voor het berekenen van de emissies. Kanttekeningen en onzekerheden bij deze berekeningsmethode van de Emissieregistratie worden verder beschreven in paragraaf 2.3.

2.2 Huidige emissietotalen Emissieregistratie

De emissies voor 2019 die worden gerapporteerd door de Emissieregistratie zijn weergegeven in Tabel 1. Dit betreft de voorlopige emissiecijfers van Emissieregistratie ronde 2023. Een overzicht voor de reeks 2015 tot en met 2022 is opgenomen in bijlage A. Voor de kleinere vliegvelden worden de emissies van grondmaterieel niet bepaald. Het berekende brandstofverbruik van grondmaterieel wordt in Tabel 2 getoond.

Tabel 1: Emissies grondmaterieel grote en middelgrote luchthavens volgens Emissieregistratie voor het jaar 2019, in kg

Stofnaam	AMS	EIN	RTHA	MAA	GAE
Koolstofdioxide (CO_2)	26.135.741	1.580.775	623.792	580.757	62.263
Koolstofmonoxide (CO)	115.445	6.983	2.755	2.565	275
Stikstofoxiden, als NO_2	169.974	10.281	4.057	3.777	405
Ammoniak (NH_3)	86,5	5,2	2,1	1,9	0,2
Distikstofoxide (N_2O)	1.167,3	70,6	27,9	25,9	2,8
Elementair koolstof (EC2.5)	3.222,1	194,9	76,9	71,6	7,7
Koolwaterstoffen (THC)	25.417,7	1.537,3	606,7	564,8	60,6
Fijnstof (PM10)	6.585,9	398,3	157,2	146,3	15,7
Fijnstof (PM2,5)	6.256,6	378,4	149,3	139,0	14,9
Zwaveldioxide (SO_2)	172,7	10,4	4,1	3,8	0,4

Tabel 2: Dieselverbruik grondmaterieel grote en middelgrote luchthavens volgens Emissieregistratie (in TeraJoule onderste stookwaarde)

Brandstof	Jaar	AMS	EIN	RTHA	MAA	GAE
diesel	2015	347,81	15,92	7,71	3,73	1,08
diesel	2016	348,61	17,18	7,73	3,53	0,92
diesel	2017	360,61	19,47	7,49	4,49	1,10
diesel	2018	389,39	20,64	8,16	7,33	1,23
diesel	2019	369,21	22,33	8,81	8,20	0,88
diesel	2020	252,86	9,90	2,93	9,03	0,19
diesel	2021	252,86	11,28	3,74	9,44	0,30

2.3 Onzekerheidsinschatting

Binnen de Emissieregistratie wordt de onzekerheid van de brandstof- en emissietotalen voor grondmaterieel geschat op 10% voor de activiteitdata (= totale brandstofinzet) en variërend van 20% voor de emissiefactoren voor SO_x, 50% voor NO_x, 100% voor PM, en 200% voor NH_3 (zie Geilenkirchen et al., 2023). Aangezien Schiphol naar verwachting veruit het grootste aandeel heeft in de emissies van grondmaterieel, lijkt dit een redelijke schatting voor de onzekerheid van het emissietotaal. De onzekerheid voor de emissiebepaling voor de individuele middelgrote luchthavens is zeker groter, omdat er tot op heden bij de Emissieregistratie weinig bekend is over het materieelpark en de inzet hiervan op deze luchthavens.

De onzekerheid van de emissiecijfers wordt bepaald door een aantal factoren:

- Er is geen registratie of andersoortige publiek beschikbare gegevens over het grondgebonden materieelpark op Nederlandse luchthavens. Hierdoor zijn elementen zoals vlootsamenstelling, leeftijdsverdeling, motorvermogens etc. bij de Emissieregistratie grotendeels onbekend.
- Emissies zijn afhankelijk van hoe machines worden ingezet, bijvoorbeeld het motorbelastingprofiel, draaiuren, onderhoud, veroudering, enzovoort. Deze gegevens zijn ook grotendeels onbekend en zijn een extra bron van variatie en onzekerheid.
- De emissiecijfers worden alleen op machineniveau bepaald voor Schiphol. De emissies van grondmaterieel op de middelgrote luchthavens worden geschaald op basis van MTOW.
- Sommige emissiefactoren die voor Schiphol gebruikt zijn, zijn gebaseerd op basis van de geldende emissienormstelling, terwijl bekend is dat de werkelijke emissies voor sommige mobiele machines kunnen afwijken van de normstelling. Dit kan leiden tot onderschatting van de werkelijke emissies, maar kan ook tot een overschatting leiden.

2.4 Voorgestelde rekenmethode

Het EMMA- rekenmodel (Hulskotte & Verbeek, 2009) wordt door TNO gebruikt voor het berekenen van het brandstofgebruik en de emissies van mobiele werktuigen voor de Nederlandse Emissieregistratie. Dit omvat machines zoals graafmachines, tractoren, laadschoppen, kettingzagen etc. Dit rekenmodel kan de emissies van een machine berekenen aan de hand van gegevens over het type machine, het motorvermogen, de motorbelasting, het motortype (diesel, benzine 2-takt etc.), de emissieclassificering en het

jaarlijkse aantal draaiuren. De gebruikte emissiefactoren van met name NOx zijn grotendeels gebaseerd op, of gevalideerd met praktijkmetingen.

De brandstof- en emissieberekeningen in het EMMA-model worden toegelicht in Geilenkirchen et al. (2023), hoofdstuk 9. Voor de volledigheid wordt hieronder de formule voor de emissieberekening van CO, NO_x, PM, NH_3 en THC gegeven:

Vergelijking 3: Emissieberekening EMMA – motorafhankelijke stoffen

$$\begin{aligned} Emissie = {} & aantal\ machines \times motorvermogen \times draaiuren \\ & \times aandeel\ draaitijd\ in\ vermogensrange \\ & \times emissiefactor\ voor\ vermogensrange \end{aligned}$$

Waarin:

- Emissie = emissie (gram);
- Aantal machines = het aantal machines van een bepaald bouwjaar en met een bepaalde emissienorm;
- Motorvermogen = Het nominale motorvermogen van de machine (kW);
- Draaiuren = de totale tijd dat de motor draait (uren);
- Aandeel draaitijd in vermogensrange = het gemiddelde aandeel van de totale draaitijd dat de machine op een gegeven motorvermogensrange draait (%);
- Emissiefactor voor vermogensrange = Emissiefactor specifiek voor de brandstof/motortype, motorbelasting en emissienormering (gram/seconde*kW (nominaal)).

De emissies van overige stoffen (CO_2, SO_2, N_2O) worden afgeleid uit het brandstofverbruik.

Indien bovenstaande gegevens kunnen worden verzameld m.b.t. de kenmerken en inzet van het materieelpark op de Nederlandse luchthavens, kan met het EMMA-model een berekening worden uitgevoerd om de jaarlijkse emissies van dit materieelpark te bepalen. Door aanvullende praktijkmetingen aan specifieke grondgebonden machines zouden de emissiefactoren voor het EMMA-rekenmodel verder kunnen worden verbeterd.

Het is de verwachting dat de berekening op basis van gegevens over het daadwerkelijke materieelpark betrouwbaardere resultaten oplevert voor de middelgrote luchthavens dan de huidige methode in de Emissieregistratie, omdat deze methode beter rekening houdt met aspecten die het meest bepalend zijn voor de emissies (zoals machinekenmerken en inzet). Deze methode is daarmee ook geschikter voor het monitoren van eventuele emissiereductie door vernieuwing van materieel of andere maatregelen, wat met de huidige methode in de Emissieregistratie maar zeer beperkt mogelijk is.

Omdat de methode die KES hanteert voor het bepalen van de emissies van grondgebonden materieel op Schiphol op hoofdlijnen vergelijkbaar lijkt met de EMMA-methodiek, zou een vergelijking tussen de resultaten van deze twee methoden voor de luchthaven Schiphol kunnen bijdragen aan meer inzicht en mogelijke verbeterpunten voor één of beide methoden.

3 Dataverzameling

3.1 Introductie uitvraag

Voor de luchthavens GAE, MAA, RTHA en Eindhoven Airport is een inventarisatie van het volledige grondmaterieel park uitgevraagd middels een gestandaardiseerd formulier.

De uitvraag betrof een overzicht van het complete machinepark, met daarbij de volgende gegevens per machine:
- Type grondmaterieel
- Merk en type (nummer)
- Aantallen
- Draaiuren per jaar
- Onbelaste en typische motorbelasting
- Brandstofsoort
- Motorvermogen
- Bouwjaar
- Emissieklasse
- Brandstofinzet per jaar (ter validatie)

De verwachting was dat met een compleet overzicht van bovenstaande gegevens een nauwkeurige brandstof- en emissieberekening uitgevoerd kan worden met het EMMA-model. De brandstofinzet per jaar is geen invoer in het EMMA-model, maar kan als validatie worden gebruikt.

Gezien de omvang van het materieelpark op Schiphol, en het feit dat KES een eigen database heeft van vrijwel al het grondmaterieel op Schiphol, is voor deze luchthaven niet gevraagd om het formulier in te vullen. Wel is gevraagd of de database van grondmaterieel voor deze studie mocht worden gebruikt, omdat de verwachting was dat deze vergelijkbare gegevens zou bevatten waarmee de emissieberekeningen konden worden uitgevoerd met het EMMA-model, ter vergelijking met de brandstof- en emissietotalen die KES oplevert voor de Emissieregistratie.

3.2 Verkregen data

3.2.1 Groningen Airport Eelde

Luchthaven GAE geeft aan de vragenlijst zo compleet mogelijk gemaakt te hebben. Er is een overzicht met 20 machines aangeleverd, welke in 2022 zijn gebruikt. Het overzicht omvat o.a. loaders, GPU's, ASU's, tractoren, de-icers, en een ambulift.

De volgende gegevens ontbraken (deels) in het overzicht:
- Onbelaste en typische motorbelasting (voor alle machines)
- Motorvermogen (voor één voertuig)
- Bouwjaar (voor één voertuig)
- Emissieklasse (voor meerdere voertuigen)

Tevens is aangegeven dat de brandstofinzet per voertuig niet exact bekend was, maar zo goed mogelijk is ingeschat. De nauwkeurigheid van de opgegeven draaiuren is niet bekend. Voor sommige machines zijn deze precies opgegeven, voor andere zijn het grote afgeronde getallen die mogelijk zijn ingeschat.
Een deel van de opgegeven machines is elektrisch aangedreven.

3.2.2 Maastricht Aachen Airport

Luchthaven MAA heeft ook een overzicht van het materieelpark aangeleverd, zo compleet als mogelijk. Het betreft de gegevens over het jaar 2021. Het materieelpark omvat 52 machines. Het overzicht bevat een grotere variatie aan materieeltypen dan voor luchthaven GAE, met naast loaders, GPU's, ASU's en tractoren ook een brandstoftruck, passagiersbussen en brandweerwagens.

De volgende gegevens waren niet volledig:
- Onbelaste en typische motorbelasting (voor alle machines)
- Motorvermogen (voor meerdere voertuigen)
- Bouwjaar (voor meerdere voertuigen)
- Emissieklasse (voor meerdere voertuigen)
- Draaiuren (voor meerdere voertuigen)
- Brandstofhoeveelheid (voor meerdere voertuigen)
- Indien meerdere machines van zelfde type zijn ingevoerd, is niet duidelijk welke draaiuren horen bij welk bouwjaar

Tevens is aangegeven dat de brandstofinzet per voertuig niet exact bekend was, maar zo goed mogelijk is ingeschat op basis van tankpasdata voor een periode van enkele maanden. De nauwkeurigheid van de opgegeven draaiuren is niet bekend. Voor sommige machines zijn deze precies opgegeven, voor andere zijn het grote afgeronde getallen die mogelijk zijn ingeschat. Een deel van de opgegeven machines is elektrisch aangedreven.

3.2.3 Rotterdam The Hague Airport

Voor de luchthaven RTHA is er geen overzicht van het materieelpark geleverd. Wel heeft deze luchthaven voor meerdere jaren gegevens over het totale brandstofverbruik kunnen leveren.

3.2.4 Eindhoven Airport

Voor Eindhoven Airport is er geen overzicht van het materieelpark geleverd. Wel heeft deze luchthaven voor 2019 gegevens over het totale brandstofverbruik kunnen leveren, inclusief de verdeling over een aantal categorieën machines.

3.2.5 Schiphol

Voor Schiphol is de opgevraagde database niet ontvangen. Omdat er geen aanvullende gegevens over het grondmaterieelpark zijn aangeleverd voor luchthaven Schiphol kan er geen berekening worden uitgevoerd met het EMMA-model en kunnen de huidige brandstof- en emissiecijfers die door KES worden berekend niet worden vergeleken.

3.3 Aanvulling en bewerking

3.3.1 Groningen Airport Eelde

Op basis van geleverde gegevens heeft TNO de volgende acties uitgevoerd om de gegevens aan te vullen.

- Op basis van de bouwjaren zijn de ontbrekende emissieklassen geschat.
- Het ontbrekende motorvermogen is bepaald op basis van de typering van het voertuig.
- Vervolgens is per machine één van de standaard motorbelastingprofielen uit het EMMA-model toegekend. Hierbij is gelet op gelijkenissen tussen het type grondmaterieel en de machines die in het EMMA-model zijn opgenomen.

3.3.2 Maastricht Aachen Airport

Op basis van geleverde gegevens heeft TNO de volgende acties uitgevoerd om de gegevens aan te vullen.

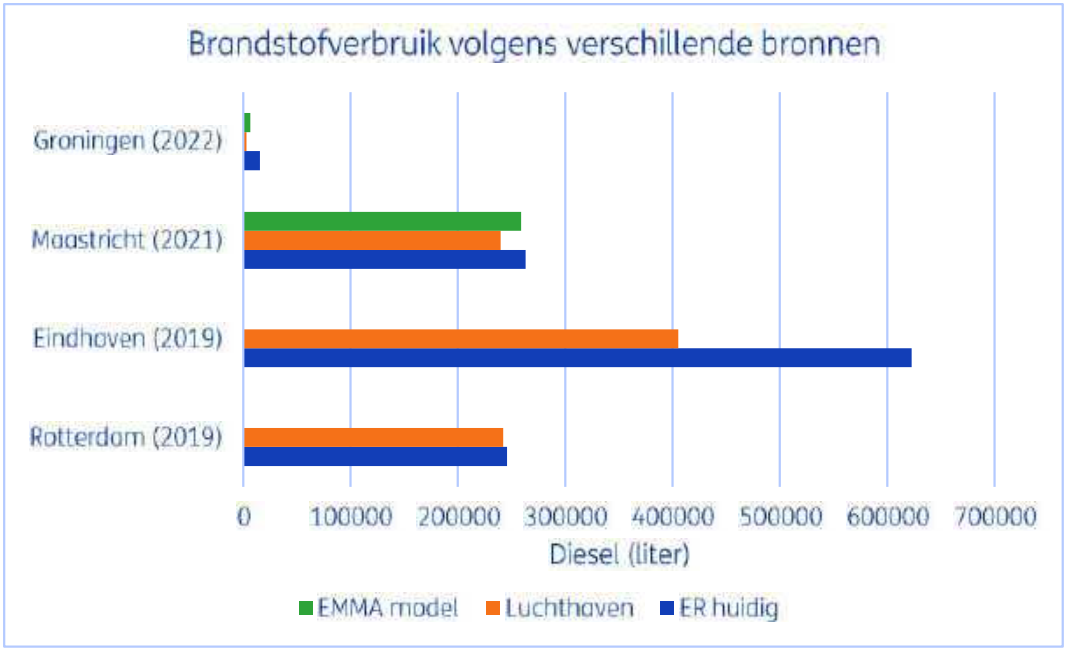
- Op basis van de bouwjaren zijn de ontbrekende emissieklassen geschat.
- Ontbrekende motorvermogens zijn bepaald op basis van de typering van het voertuig.
- Per machine is één van de standaard motorbelastingprofielen uit het EMMA-model toegekend. Hierbij is gelet op gelijkenissen tussen het type grondmaterieel en de machines die in het EMMA-model zijn opgenomen.
- Er is aangenomen dat de nieuwste machines de meeste uren hebben gedraaid.

Dit leverde zowel voor GAE als MAA voor de meeste machines voldoende gegevens op om de emissieberekening uit te voeren. Voor een aantal machines waarvoor gegevens aangeleverd door luchthaven MAA niet compleet waren en waarbij ook na aanvulling de inzet (in draaiuren) en/of het motorvermogen onbekend was, is een losse emissieberekening uitgevoerd op lager detailniveau. Hierbij zijn de emissies per hoeveelheid diesel van een referentiemachine berekend (uit het overige grondmaterieelpark van de luchthaven) en zijn deze emissiefactoren vermenigvuldigd met het door de luchthaven aangeleverde brandstofverbruik voor deze machines.

4 Resultaten

4.1 Brandstofinzet

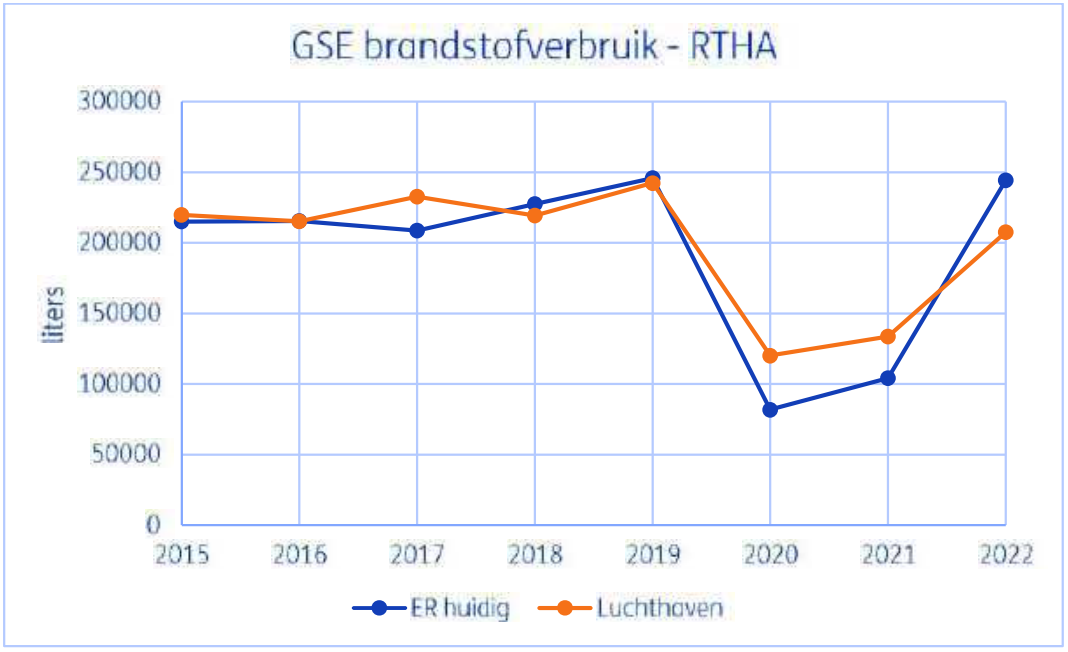
Met behulp van het EMMA-model is de brandstofinzet van het materieelpark bepaald. Deze berekening kon alleen worden uitgevoerd voor de luchthavens die gedetailleerde gegevens hebben aangeleverd over het materieelpark (GAE en MAA). Voor luchthavens die alleen een brandstoftotaal hebben aangeleverd is alleen een vergelijking mogelijk met de huidige waarde in de Emissieregistratie. Omdat voor Schiphol slechts één databron beschikbaar is, namelijk de emissietotalen berekend door KES, is deze luchthaven niet opgenomen in deze resultaten. Figuur 1 geeft een overzicht van de bevindingen.



Figuur 1: Vergelijking brandstofgebruik grondmaterieel o.b.v. verschillende bronnen

4.1.1 Rotterdam The Hague Airport (RTHA)

Voor luchthaven RTHA kon door het gebrek aan gegevens over de inzet en samenstelling van het materieelpark geen nieuwe brandstofberekening worden uitgevoerd. Wel konden de aangeleverde brandstoftotalen per jaar worden vergeleken met de huidige rapportage door de Emissieregistratie.



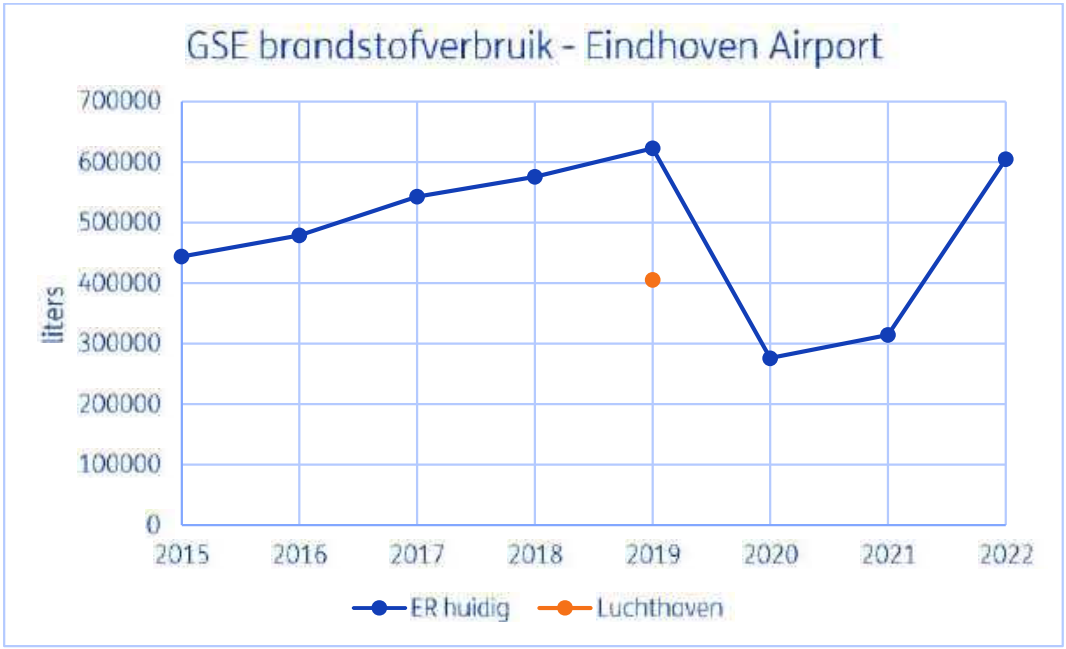
Figuur 2: Vergelijking brandstofverbruik grondmaterieel luchthaven RTHA volgens luchthaven en ER

Figuur 2 laat zien dat het resultaat van de huidige Emissieregistratie-methode behoorlijk goed in de buurt komt van de inventarisatie van de luchthaven RTHA. Dat geeft vertrouwen dat de huidige methode in de Emissieregistratie voor deze luchthaven ook zonder gegevens over het materieelpark een redelijke inschatting maakt van het brandstofgebruik en de CO_2-emissies.

De grootste afwijking is zichtbaar voor de COVID periode. Vermoedelijk onderschat de Emissieregistratie-methode het brandstofverbruik in deze jaren omdat weliswaar het aantal (passagiers)vluchten zeer sterk afneemt, maar reguliere zaken (brandweer, onderhoud, etc.) wel deels doorgaan.

4.1.2 Eindhoven Airport

Voor Eindhoven Airport kon door het gebrek aan gegevens over de inzet en samenstelling van het materieelpark geen nieuwe brandstofberekening worden uitgevoerd. Wel kon het aangeleverde brandstoftotaal voor zichtjaar 2019 worden vergeleken met de huidige rapportage door de Emissieregistratie.

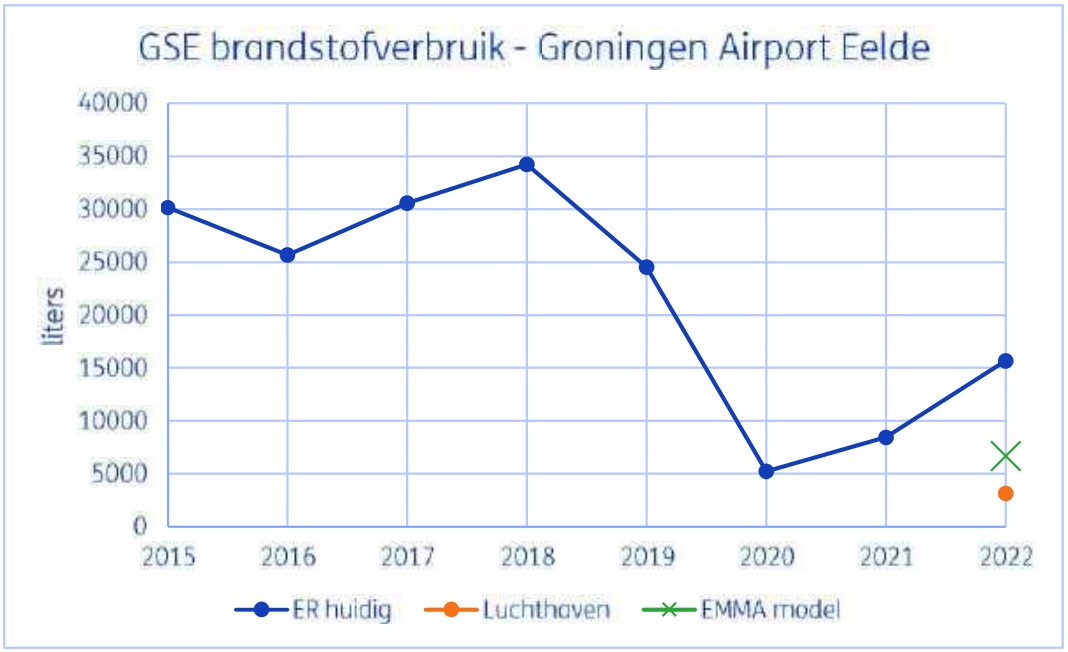


Figuur 3: Vergelijking brandstofverbruik grondmaterieel Eindhoven Airport volgens de luchthaven en ER

De opgave van de luchthaven is ca. 30% lager dan de emissieberekening in de Emissieregistratie voor 2019 (zie Figuur 3). Mogelijk is de gebruikte methode niet voldoende representatief voor deze luchthaven. Om dit verder uit te zoeken zouden de cijfers voor verschillende jaren moeten worden vergeleken. Ook kunnen gegevens over de samenstelling en inzet van het materieelpark meer inzicht geven over de oorzaak van eventuele afwijkingen.

4.1.3 Groningen Airport Eelde

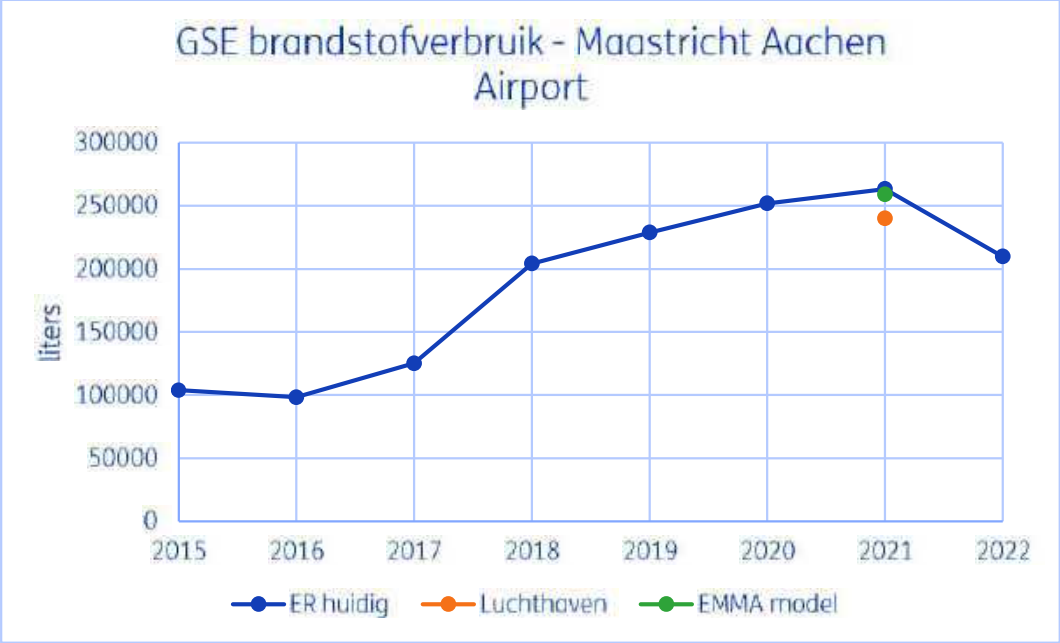
Uit de inventarisatie van de luchthaven GAE blijkt dat in 2022 er een brandstofinzet was van 3.150 liter. De rapportage door de Emissieregistratie geeft een ca. 5 maal hoger brandstofverbruik (15.670 liter). Dit suggereert dat de huidige Emissieregistratie-methode niet representatief is voor deze (relatief kleine) luchthaven. De berekeningen met het EMMA-model op basis van het materieelpark komen op een ruim tweemaal hoger brandstoftotaal uit dan de opgave van de luchthaven: 6.700 liter. Ook met gegevens over de samenstelling en inzet van het materieelpark kan er dus een behoorlijke afwijking optreden ten opzichte van de tankgegevens. De oorzaak van deze afwijking zit mogelijk in de opgave van het brandstoftotaal door de luchthaven, de opgave van de samenstelling en inzet van het materieelpark, of in de aannames die in deze studie zijn gedaan om de gegevens aan te vullen. Een vergelijking voor meerdere jaren zou duidelijk kunnen maken of deze afwijkingen structureel optreden.



Figuur 4: Vergelijking brandstofverbruik grondmaterieel luchthaven GAE volgens luchthaven, Emissieregistratie en deze studie (EMMA-model)

4.1.4 Maastricht Aachen Airport

Uit de inventarisatie van luchthaven MAA blijkt dat er in 2021 een brandstofverbruik was van ca. 240.000 liter. Dit komt vrij goed overeen met de rapportage door de Emissieregistratie (263.000 liter). De berekening op basis van gegevens over de samenstelling en inzet van het materieelpark komt nog iets dichter bij de opgave van de luchthaven (259.000 liter). Dit suggereert dat beide methoden (ER en EMMA) een vrij goede inschatting kunnen geven van het daadwerkelijke brandstofgebruik door grondmaterieel op deze luchthaven. Een vergelijking voor meerdere jaren zou duidelijk kunnen maken of dit structureel het geval is. De resterende afwijking tussen de EMMA-methode en de rapportage door de luchthaven kan verschillende oorzaken hebben, bijvoorbeeld een te hoge inschatting van de gemiddelde motorbelasting of van de jaarlijkse draaiuren. Ook valt op dat in het door de Emissieregistratie bepaalde brandstofgebruik van het grondmaterieel op luchthaven MAA geen duidelijk effect van de COVID pandemie zichtbaar is. Vermoedelijk komt dit doordat op luchthaven MAA het merendeel van de vluchten vrachtvluchten betreft, welke veel minder afnamen tijdens de pandemie.



Figuur 5: Vergelijking brandstofverbruik grondmaterieel luchthaven MAA volgens luchthaven, Emissieregistratie en deze studie (EMMA-model)

4.2 Emissies hoofdcomponenten

Met behulp van het EMMA-model zijn de emissies van een aantal stoffen bepaald. Deze berekening kon alleen worden uitgevoerd voor de luchthavens die gedetailleerde gegevens hebben aangeleverd over samenstelling en inzet van het grondmaterieelpark (GAE en MAA).

4.2.1 Groningen Airport Eelde

Onderstaande tabel toont de jaarlijkse emissies die zijn berekend op basis van de door GAE aangeleverde gegevens.

Tabel 3: Berekende emissies (kg) grondmaterieel luchthaven Groningen 2022

Stofnaam	ER huidig	EMMA-model	Ratio EMMA/ER
Koolstofdioxide (CO_2)	38.796	17,220	44%
Koolstofmonoxide (CO)	148	47	32%
Stikstofoxiden, als NO_2	227	139	61%
Ammoniak (NH_3)	0,13	0,05	37%
Distikstofoxide (N_2O)	1,8	0,14	8%
Elementair koolstof (EC2.5)	3,7	3,0	82%
Koolwaterstoffen (THC)	34	11	32%
Fijnstof (PM10)	7,5	6,1	82%
Fijnstof (PM2,5)	7,1	5,8	82%
Zwaveldioxide (SO_2)	0,26	0,11	42%

De vergelijking laat zien dat de EMMA-methode voor alle stoffen een lagere emissie berekent dan gerapporteerd door de Emissieregistratie. Dit sluit aan bij de berekening van een lager brandstoftotaal door het EMMA-model in vergelijking met de rapportage door de Emissieregistratie. De afwijkingen worden vermoedelijk veroorzaakt doordat het materieelpark van Schiphol een andere samenstelling en inzetprofiel heeft dan het materieelpark van luchthaven GAE. Daarnaast zitten er wellicht verschillen tussen de methodiek van het EMMA-model en de methodiek die KES gebruikt voor de berekeningen voor Schiphol. De grotere afwijkingen voor SO_2, NH_3 en N_2O zijn door de lage absolute emissiewaarden van beperkt belang.

4.2.2 Maastricht Aachen Airport

Onderstaande tabel toont de jaarlijkse emissies die zijn berekend op basis van de door MAA aangeleverde gegevens.

Tabel 4: Berekende emissies (kg) grondmaterieel luchthaven MAA 2021

Stofnaam	ER huidig	EMMA-model	Ratio EMMA/ER
Koolstofdioxide (CO_2)	651.489	666.014	102%
Koolstofmonoxide (CO)	2.488	1.553	62%
Stikstofoxiden, als NO_2	3.809	4.571	120%
Ammoniak (NH_3)	2,2	11,3	512%
Distikstofoxide (N_2O)	29,8	9,7	32%
Elementair koolstof (EC2.5)	61,3	83,0	135%
Koolwaterstoffen (THC)	566	353	62%
Fijnstof (PM10)	125,3	169,6	135%
Fijnstof (PM2,5)	119,1	161,1	135%
Zwaveldioxide (SO_2)	4,4	4,3	97%

Ook voor luchthaven MAA leiden de twee methoden tot een ander emissieresultaat, maar de verschillen zijn veelal kleiner dan voor GAE. Dit sluit aan bij het feit dat beide methoden tot een vergelijkbaar brandstoftotaal kwamen voor deze luchthaven. Het EMMA-model berekent een hogere emissiewaarde voor NO_x en fijnstof (PM), en lagere emissiewaarden voor CO, N_2O en THC. Wederom moet de oorzaak gezocht worden in de verschillen in samenstelling en inzetprofiel van het materieelpark, en in andere methodologische verschillen tussen de twee benaderingen.

4.3 Emissies VOS, PAKs en ZZS

De emissies van VOS componenten, PAKs (polycyclische aromatische koolwaterstoffen) en dioxinen kunnen middels speciatie-profielen worden afgeleid uit de totale emissies van koolwaterstoffen en PM. Voor deze studie worden de speciatie-profielen gebruikt die de US EPA aanbeveelt voor non-road dieselmotoren (US EPA, 2022a). Hierbij wordt onderscheid gemaakt naar de verschillende TIER klassen voor dieselmotoren en eventueel aanwezige nabehandelingstechnologie. Deze profielen zijn ook terug te vinden in de SPECIATE database van de US EPA (2022b)[2].

Bij het gebruik van deze profielen voor het bepalen van VOS componenten moet worden benadrukt dat de resulterende emissiewaarden een grote onzekerheidsmarge hebben. Allereerst kennen de THC en PM emissies waaruit ze worden afgeleid al een behoorlijke onzekerheid. Daarnaast zijn de metingen die als basis worden gebruikt voor de EPA profielen uitgevoerd op voertuigen voor de Amerikaanse markt, gebruik makende van lokale brandstoffen. Omdat de precieze brandstofsamenstelling de verhoudingen tussen VOS componenten sterk kan beïnvloeden, moet worden benadrukt dat de resultaten slechts een ruwe inschatting geven van de emissies van deze stoffen. In de Emissieregistratie worden voor de emissies van grondmaterieel tot op heden oude profielen gebruikt die zijn afgeleid uit Veldt et al. (1993). Deze profielen onderscheiden minder stoffen dan de profielen van de US EPA.

[2] De profielen zijn bepaald o.b.v. de totale uitstoot van organische gassen (TOG). Om de berekende uitstoot van totale koolwaterstoffen (THC) om te rekenen naar TOG wordt, zoals voorgeschreven in de EPA publicatie, eerst vermenigvuldigd met 1.15 om de VOS emissie te bepalen, waarna een profiel-specifieke correctie wordt toegepast om van VOS naar TOG om te rekenen. Vervolgens wordt het profiel toegepast op de TOG emissie.

De tabellen met emissies zijn opgenomen in Bijlage B en tonen naast een emissiebepaling ook welke stoffen zijn opgenomen in de Nederlandse ZZS lijst, namelijk de stoffen waarbij een ZZS stofklasse vermeld is. De tabellen tonen daarnaast de huidige emissiewaarden in de Emissieregistratie en de emissiebepaling voor het machinepark bij een volledige transitie naar Stage V machines (zie paragraaf 5.2 voor meer toelichting over deze emissiereductie-optie). In vergelijking met de huidige emissiewaarden in de Emissieregistratie valt op dat, naast het feit dat de EMMA-methode veel meer stoffen omvat, voor veel emissiewaarden de afwijking in de resultaten van de twee methoden beperkt is tot enkele tientallen procenten. Een uitzondering is Indeno(1,2,3-cd) pyrene, waar de EMMA-berekening op veel hogere waarden uitkomt. De fractie uit het speciatie-profiel van de Emissieregistratie staat op 1*10^-9, terwijl de originele gegevensbron een waarde van 0 rapporteert (Geilenkirchen et al., 2023; Veldt et al., 1993). Er is waarschijnlijk besloten om een zeer lage fractie op te nemen in de Emissieregistratie omdat de concentratie van deze stof in de onderliggende meting niet boven de detectielimiet lag, maar deze vermoedelijk wel in geringe mate aanwezig was. De modernere SPECIATE-profielen bevatten wel daadwerkelijke fracties voor deze stof, die in lijn zijn met de fracties voor andere PAK stoffen.

Om de mogelijke gezondheidseffecten in te schatten, moeten naast de jaarlijkse emissies ook lokale concentraties in de buitenlucht en daarmee de blootstelling worden bepaald. Beide zijn geen onderdeel van deze studie.

Ter context moet worden benadrukt dat, behalve op luchthavens, deze zelfde stoffen ook kunnen worden uitgestoten door andere (diesel)motoren en verbrandingsinstallaties, bijvoorbeeld door het wegverkeer. Emissietotalen per sector worden gepubliceerd door de Emissieregistratie.

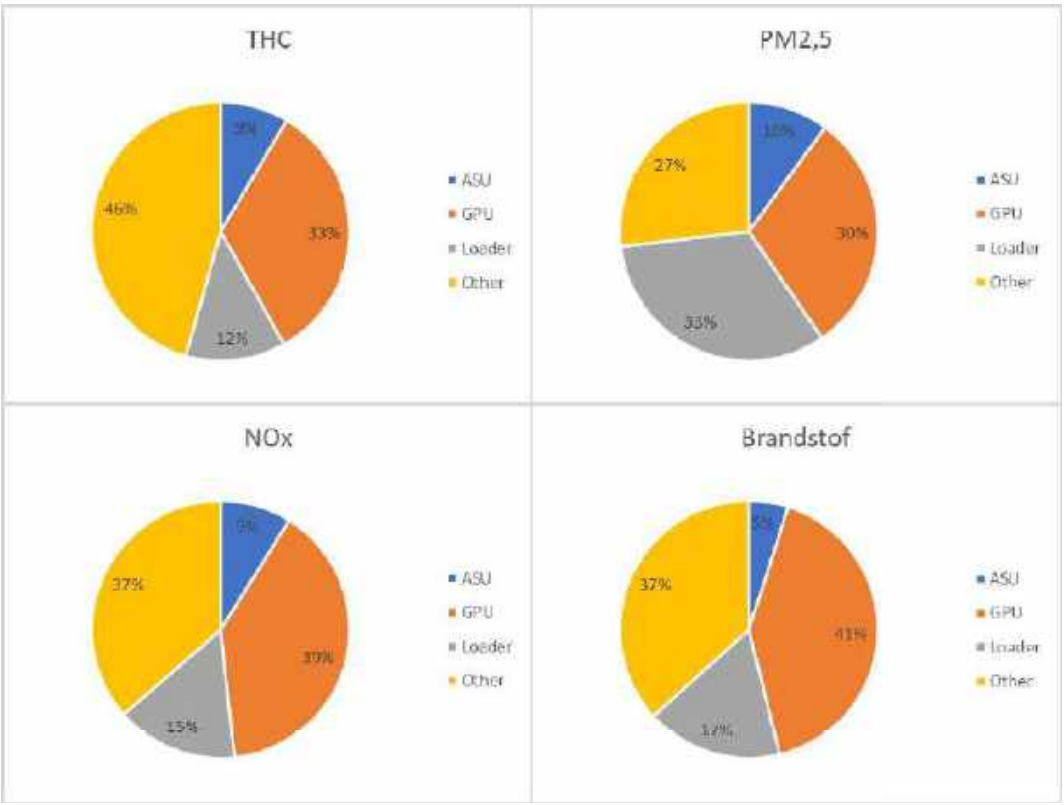
4.4 Grootste emissiebronnen binnen het grondmaterieel

Hieronder wordt per luchthaven de uitsplitsing gegevens van de met het EMMA-model berekende emissies van enkele van de meest gezondheidsrelevante[3] stoffen (PM2,5, NOx en THC) en het brandstofverbruik naar de verschillende categorieën machines zoals aangeleverd door de luchthavens.

4.4.1 Groningen Airport Eelde

Op luchthaven GAE wordt volgens de berekeningen met het EMMA-model zo'n 40% van de emissies uitgestoten door de GPU's, waarmee deze materieelcategorie de grootste bijdrage levert aan de emissies (zie Figuur 6). De categorie "other" bevat een selectie aan andere materieeltypen zoals de-icers, verrijdbare trappen en een ambulift. In vergelijking met luchthaven MAA (zie Figuur 7) valt wederom de veel kleinere variëteit aan grondmaterieel op GAE op. Zo zijn er geen brandstoftrucks, brandweer of passagiersbussen opgegeven. De towing tractors op luchthaven GAE zijn allemaal elektrisch en zijn daarom niet opgenomen in Figuur 6.

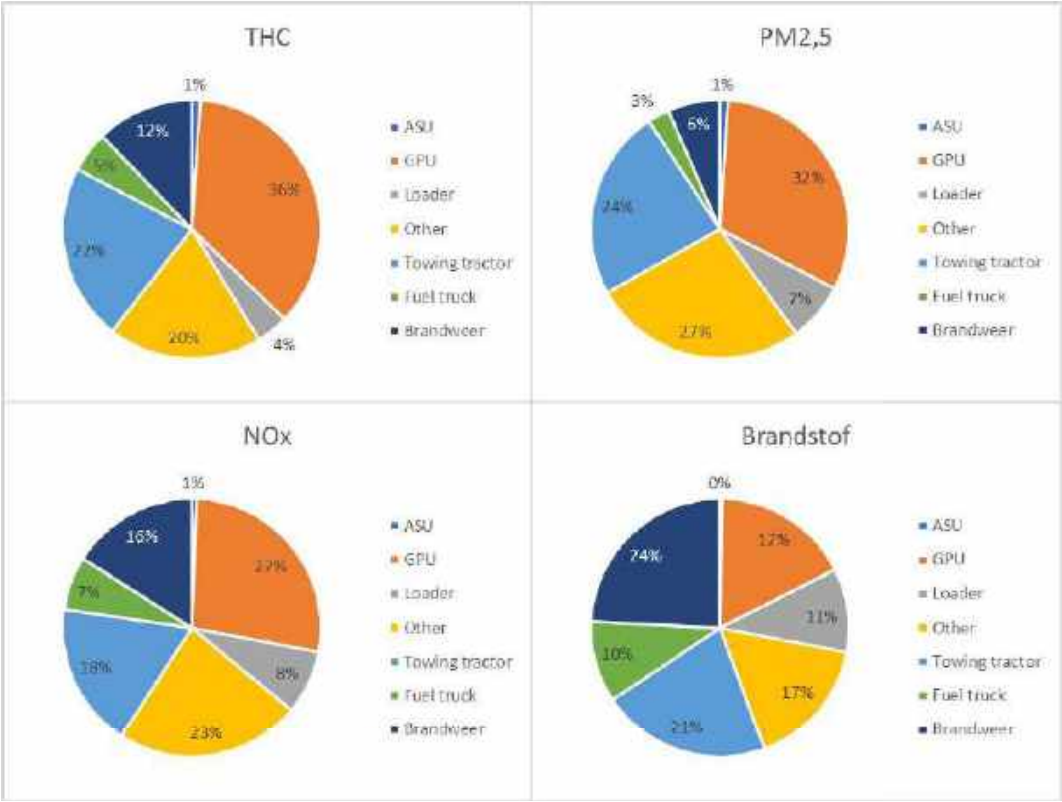
[3] De World Health Organization (WHO) hanteert luchtkwaliteitsnormen voor NO_2, PM2.5 en PM10. THC omvat o.a. PAKs en andere Zeer Zorgwekkende Stoffen.



Figuur 6: Verdeling emissies (en brandstofgebruik) grondmaterieel luchthaven GAE volgens berekeningen EMMA-model

4.4.2 Maastricht Aachen Airport

Op luchthaven MAA zijn de brandweerwagens een significante emissiebron volgens de berekeningen met het EMMA-model, met ca. 24% van het brandstofverbruik en CO_2 emissies en zo'n 16% van de NO_x emissies. De GPU's zijn verantwoordelijk voor ca. 17% van de CO_2 emissies, maar leveren een grotere bijdrage aan de NO_x emissies (27%), PM emissies (32%) en THC emissies (36%). De tractoren die worden ingezet hebben een bijdrage van rond de 18% – 24% aan de emissies van de meeste stoffen (zie Figuur 7).



Figuur 7: Verdeling emissies (en brandstofgebruik) grondmateneel luchthaven MAA volgens berekeningen EMMA-model

5 Verduurzamingspotentieel

5.1 Beschrijving verduurzamingsopties

Deze paragraaf geeft een overzicht van de mogelijke verduurzamingsopties voor grondgebonden machines of voertuigen voor vliegvelden. De beschreven opties zijn:

- Vervanging oudere machines door Stage V (meest recente emissieklasse)
- Retrofitting (achteraf inbouwen van SCR en/of roetfilter)
- Volledige vervanging door uitstootvrije varianten
- Beperkte elektrificatie
- Inpassing waterstof (brandstofcel en verbrandingsmotor)
- De inpassing van HVO (biobrandstof) (Dit is een maatregel die zich focust op verduurzaming van klimaat).

Iedere optie wordt beschreven, waarna een inschatting wordt gemaakt van het verduurzamingspotentieel voor grondgebonden machines en voertuigen.

Gedurende het project is duidelijk geworden dat verschillende opties reeds door de luchthavens worden ingezet. Alle vijf de luchthavens zijn met name bezig om het grondmaterieel (versneld) te elektrificeren. Dit om het doel voor de grondgebonden emissies in de luchtvaartnota 2020-2050 [4] te realiseren: In 2030 mogen grondgebonden activiteiten van de burgerluchtvaart geen CO_2 meer uitstoten.

5.2 Vervangen oudere (diesel)machines door Stage V

De machines en voertuigen op de vliegvelden kunnen in potentie worden vervangen door machines met schonere dieselmotoren. De meest recente emissienormen hiervoor zijn Euro6d (sinds 2018) voor lichte wegvoertuigen en Euro VI (sinds 2014) voor zware wegvoertuigen. Voor mobiele werktuigen is de laatste emissienorm in 2019 geïntroduceerd: de Stage V-norm (EU 2016/1628). De voertuigen of machines die aan deze emissienormen voldoen, zijn de schoonste dieselmotoren die in de markt beschikbaar zijn voor de betreffende categorieën. Dit is met name relevant voor NO_x en fijnstof-emissies.

Voor mobiele werktuigen is vervanging door nieuwere verbrandingsmotoren slechts ten dele effectief. Dit is onder andere afhankelijk van de vermogensklasse van dit materieel. Grofweg zijn er 5 categorieën in vermogensklassen:

1. Mini (tot 19kW);
2. Klein (tot 19-37/56 kW);
3. Middelgroot (56-130 kW);
4. Groot (130-560 kW);
5. Zeer groot (>560 kW).

[4] https://zoek.officielebekendmakingen.nl/blg-878042.pdf

Met name voor het 'mini'-materieel is geen schoon alternatief beschikbaar bij vervanging met een nieuwe verbrandingsmotor. De emissie-eisen voor deze categorie zijn immers zeer mild, zowel voor NO_x als voor fijnstof. Voor fijnstof is voor de overige categorieën (tot 560 kW) doorgaans wel een schoon alternatief beschikbaar; dit zijn Stage V-machines die zijn uitgerust met een gesloten roetfilter. Voor NO_x zijn er voor mini tot klein (<56 kW) materieel geen schone dieselmotoren beschikbaar, omdat deze fabriek-af geen SCR-katalysator bevatten (vanwege de milde emissie-eisen). Bij middelgroot tot groot (56 – 560 kW) materieel biedt Stage IV of V wel een schoner alternatief dan oudere machines door toepassing van een SCR katalysator (NO_x-limiet is een factor 5 tot 12 omlaag gegaan afhankelijk van de vermogenscategorie). Voor zeer groot materiaal is met het oog op NO_x geen schoon alternatief met verbrandingsmotor beschikbaar.

Voor de vliegvelden GAE en MAA is de vlootsamenstelling gegeven. Tabel 5 en Tabel 6 tonen de verwachte emissiereducties voor respectievelijk GAE en MAA die kunnen worden behaald wanneer alle machines met een brandstofmotor die niet voldoen aan de STAGE V emissienormering worden vervangen door nieuwe STAGE V machines. Hierbij wordt verder uitgegaan van dezelfde specificaties en inzet. Voor brandstofgebruik kan in principe eenzelfde reductiepercentage als voor kooldioxide (CO_2) worden aangenomen. De verwachte reductie van NO_x (55%) en fijnstof (95%) is fors. Let wel dat de werking van de SCR katalysator, en daarmee de reductie in NO_x emissies, afhangt van het tijdig aanvullen van de AdBlue tank. De verwachte reductie in THC emissies en daarmee ook van PAKs en verschillende ZZS ligt in de meeste gevallen rond de 90% of hoger (zie ook Tabel 5 en Tabel 6). Door toepassing van SCR (selective catalytic reduction) technologie om de emissies van NO_x te verminderen, nemen de emissies van NH_3 en N_2O naar verwachting toe.

CO_2-uitstoot wordt met name bepaald door de energievraag van de machines (= draaiuren x vermogen). Een moderne dieselmotor zal naar verwachting een lager brandstofverbruik hebben dan een oudere, al zijn deze verschillen in verhouding met de luchtverontreinigende stoffen klein. Deze verduurzamingsoptie zal daarom niet leiden tot een forse CO_2-reductie.

Tabel 5: Emissies (kg) grondmaterieel luchthaven GAE: huidige samenstelling vs. bij vervanging huidige machines door machines die voldoen aan STAGE V emissienormering

Stofnaam	Emissiejaar	EMMA-model huidige samenstelling	EMMA-model STAGE V	Reductie
Koolstofdioxide (CO_2)	2022	17.220	14.690	15%
Koolstofmonoxide (CO)	2022	47	4,1	91%
Stikstofoxiden, als NO_2	2022	139	63	54%
Ammoniak (NH_3)	2022	0,05	0,99	-1958%
Distikstofoxide (N_2O)	2022	0,14	0,55	-289%
Elementair koolstof (EC2.5)	2022	3,0	0,1	96%
Koolwaterstoffen (THC)	2022	10,9	1,5	86%
Fijnstof (PM10)	2022	6,1	0,3	96%
Fijnstof (PM2,5)	2022	5,8	0,2	96%
Zwaveldioxide (SO_2)	2022	0,11	0,09	15%

Tabel 6: Emissies (kg) grondmaterieel luchthaven MAA: huidige samenstelling vs. bij vervanging huidige machines door machines die voldoen aan STAGE V emissienormering

Stofnaam	Emissiejaar	EMMA-model huidige samenstelling	EMMA-model STAGE V	Reductie
Koolstofmonoxide (CO)	2021	1.553	151	90%
Stikstofoxiden, als NO_2	2021	4.571	2.158	53%
Ammoniak (NH_3)	2021	11,3	45,6	-303%
Distikstofoxide (N_2O)	2021	9,7	24,8	-155%
Elementair koolstof (EC2.5)	2021	83,0	3,7	96%
Koolwaterstoffen (THC)	2021	353	31	91%
Fijnstof (PM10)	2021	169,6	7,6	96%
Fijnstof (PM2,5)	2021	161,1	7,2	96%
Zwaveldioxide (SO_2)	2021	4,3	3,9	9%

5.3 Opties voor retrofitting

Naast het vervangen van machines door een Stage V-variant, is het ook mogelijk om bij oudere machines een zogenaamde 'retrofit' toe te passen, oftewel het achteraf inpassen van emissie-nabehandelingssystemen (zowel roetfilter als SCR). Hiermee kunnen de emissies van oudere machines en machines met hogere vermogensklassen potentieel worden gereduceerd richting de Stage V-norm. Hierbij dient de nuance gemaakt te worden dat dit per fabrikant en model erg kan verschillen. In de praktijk is het behalen van grote reducties niet trivioal. Onder andere de levensduur van de machines kan een belangrijk besliscriterium zijn voor het retrofitten van een machine. Goede monitoring op NO_x- en NH_3-emissies is noodzakelijk om deze optie succesvol in te zetten.

5.4 Alle machines vervangen door uitstootvrije machines

Grondgebonden machines en voertuigen hebben doorgaans de optie om elektrisch te opereren; of [1] via een vaste bekabeling (bij machines) ofwel [2] door middel van accu's, gegeven de beschikbaarheid van een elektrische variant. Waterstof [3] in combinatie met een brandstofcel of [4] in een verbrandingsmotor is hiervoor een alternatief, al is deze laatste variant lokaal niet uitstootvrij. Hierbij is de randvoorwaarde dat de elektriciteitsvoorziening toereikend is voor de bekabelde machines en het laden van de accu's.

Deze eerste variant heeft een aantal voordelen. Een vaste bekabeling aan elektrisch materieel zorgt voor de minste energieverliezen. Wanneer een voertuig enkel stationair gebruikt hoeft te worden, en er voldoende beschikbare capaciteit op het elektriciteitsnet is, kan deze via bekabelen elektrificeren, zonder dat een accupakket nodig is. Mogelijk zouden bijvoorbeeld GPU's vervangen kunnen worden door vaste bekabeling ("gate power",

vergelijkbaar met walstroom voor schepen), zoals op Schiphol op 73 vliegtuigopstelplaatsen het geval is[5].

Het gebruik van accu's op grondgebonden machines maakt het mogelijk om mobiel te opereren. Het is mogelijk om accu's op te laden op het moment dat de machine niet wordt gebruikt. Bij verwisselbare accu's is deze flexibiliteit nog groter; accu's kunnen zo op andere locaties worden opgeladen dan waar ze gebruikt worden. Hierbij moet wel rekening worden gehouden met extra vervoersbewegingen en daarmee mogelijk extra uitstoot. Voor wegvoertuigen is een vast accupakket het meest gangbaar. Voor machines met een laag motorvermogen en weinig inzet, is een (klein) accupakket het meest voor de hand liggend. Voor een gerichter advies over de beste optie, zijn meer gegevens over inzet en de omgeving van het materieel nodig.

Een belangrijke kanttekening bij deze variant is de laadtijd en capaciteit van accu's. Wanneer een machine of voertuig een hele dag werkzaam is, zal deze waarschijnlijk moeten bijladen. Dit kan zorgen voor een stagnatie van de operationalisering van de machine of het voertuig. Andere inrichting van werkzaamheden kan voor dit probleem een oplossingsrichting zijn. Hierbij kan worden gedacht aan 'gedeeltelijk laden in de pauze'. Afhankelijk van de machine/voertuig kan dit voldoende zijn om de operatie een gehele dag vol te houden.

Optie drie en vier, waterstof aangedreven machines/voertuigen, kunnen zich ontwikkelen als alternatieven om bestaande grondvoertuigen te vervangen. Hierbij dient onderscheid gemaakt te worden tussen waterstof met brandstofcel, en waterstof in de verbrandingsmotor. Bij deze eerste variant is er geen lokale uitlaatemissie, terwijl bij de tweede variant wel luchtverontreinigende stoffen vrijkomen, al is er weinig bekend over de mate hiervan. Daarnaast is het mogelijk dat in de keten voor het opwekken van waterstofemissies zijn vrijgekomen, zogenaamde ketenemissies. Ditzelfde geldt voor elektriciteit, maar het ketenrendement van waterstof ligt lager. Voldoende voorraad van duurzame elektriciteit is dus van belang voor duurzame energie, zowel binnen als buiten de transportsector.

Over de gehele keten gezien is het totale energierendement van accu/kabel-elektrisch aangedreven werk- en voertuigen hoger dan bij verbrandingsmotoren. Ook zijn ze beter in hun ketenefficiëntie dan werk- of voertuigen die zijn aangedreven door waterstof.

Als vliegvelden ervoor kiezen om waterstof-aangedreven varianten voor hun voertuigen en machines, dan wordt aanbevolen om rekening te houden met de beschikbaarheid van energie en het ketenrendement van de aandrijving.

5.5 Inschatting beperkte elektrificatie

Zoals in de vorige paragraaf is beschreven, zijn er verscheidene opties om machines en voertuigen op vliegvelden te elektrificeren. Het is ook mogelijk om te kiezen voor een beperkte elektrificatie, om vervolgens andere machines later te elektrificeren, of te kiezen voor andere verduurzamende maatregelen.

Om hier een afweging in te maken, zijn twee factoren belangrijk: de inzet van de machine/voertuig en de vermogensklasse. De lagere vermogensklassen van machines en voertuigen zijn doorgaans sneller geschikt voor elektrificatie, vanwege de kleinere benodigde accupakketten en daarmee lagere investeringen. Hierbij dient de kanttekening worden gezet

[5] https://www.schiphol.nl/nl/schiphol-group/pagina/elektriciteit-voor-het-vliegtuig/

dat machines die specifiek voor vliegvelden worden gemaakt niet duidelijk in beeld zijn bij TNO en hier dus geen inschatting kan worden gemaakt van beschikbaarheid. Op basis van de beperkte analyse van de luchthavens in deze studie, lijken 'towing trucks', trappen, horizontaal transport en diverse liften de meest kansrijke opties op korte termijn. Onderzoek van Mel (2020) bevestigt de geschiktheid van het vervangen van 'towing trucks' door elektrische varianten. Andere voertuigen die in dit onderzoek als geschikt worden geacht voor elektrificatie zijn lower deck loaders, main deck loaders en container transporters.

Deze lichtere voertuigen vragen eveneens minder vermogen van het net of de accu. Dit maakt het makkelijker in te passen in de bestaande netcapaciteit en vraagt om minder investeringen vanwege een kleiner accupakket. Zo zijn motoren van trappen op vliegvelden vaak van lage motorvermogens en worden niet intensief ingezet. Deze zouden dus relatief eenvoudig kunnen worden geëlektrificeerd, indien deze nog niet elektrisch zijn. Een ander belangrijk voordeel is dat voor de kleinere machines <56 kW geen schone diesel alternatieven beschikbaar zijn (m.b.t. tot NO_x en fijnstof).

Anderzijds zijn de hogere vermogens met juist een intensief gebruik (bijvoorbeeld een GPU of ASU) interessant voor het dekken van de investering: wanneer een machine veel wordt ingezet, kan de investering voor de elektrische variant worden terugverdiend door de verwachte lagere operationele kosten. Ook hebben machines die veel energie vragen typisch de grootste impact op de emissiereducties. Een Stage V-motor zou echter ook een grote reductie opleveren voor NO_x en fijnstof. Voor CO_2-reductie heeft elektrificatie nog steeds een grote winst ten opzichte van een Stage-V motor.

Voor dit onderzoek zijn gesprekken gevoerd met betrokkenen vanuit diverse luchtvaartinstanties. Hier zijn enkele inzichten over het elektrificeren van het machinepark uit voortgekomen. Het lijkt voor de meeste luchthavens voor het merendeel van de machines haalbaar om naar elektrische varianten over te gaan. Daarentegen worden meermaals een aantal uitzonderingen benoemd.

Eén van de machines waarbij een elektrische variant nog lastig lijkt, is de de-icer. Deze machine verwarmt de vloeistof die gebruikt wordt om (met name) de vliegtuigvleugels ijsvrij te maken en te houden bij opstijgen. De de-icers vragen in kort tijdsbestek veel energie en zijn daarom lastiger te elektrificeren. Daarnaast worden vaak brandweerwagens genoemd als uitzondering. De reden hierachter lijkt vooral te zitten in de totale hoeveelheid beschikbare energie. Ook hebben deze voertuigen een garantie nodig dat zij niet zonder energie komen als een reddingsactie nog niet klaar is.

5.6 HVO

HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) is een alternatieve brandstof die ingezet kan worden voor het behalen van CO_2-reductie. HVO kan worden ingezet op materieel met een dieselmotor, dit wordt momenteel ook al toegepast op diverse luchthavens (o.a. op Schiphol en Rotterdam The Hague airport). De impact van HVO op emissies van luchtverontreinigende stoffen is nog onzeker maar beperkt. Om een goed beeld te krijgen van emissiereductie door toevoeging van HVO zijn er emissiemetingen nodig, alsmede informatie over de toepassing van HVO in de reguliere dieselmotor. Ook moet er informatie beschikbaar zijn over de specificaties van de motor.

6 Conclusies

Eén van de doelen van dit onderzoek was om de uitstoot van het grondgebonden materieelpark op Nederlandse luchthavens zo goed als mogelijk in kaart te brengen. Hiervoor is uitvraag gedaan bij de vijf grootste luchthavens naar de samenstelling en inzet van hun grondgebonden materieelpark om deze gegevens vervolgens te gebruiken in het EMMA-rekenmodel van TNO om de emissies te berekenen. Omdat er geen openbare emissiemetingen beschikbaar zijn, toetsen we de voorgestelde methode middels een vergelijking met de huidige emissiecijfers die worden gepubliceerd door de Nederlandse Emissieregistratie (ER), alsmede door een vergelijking op brandstofniveau met door luchthavens aangeleverde brandstoftotalen.

Twee luchthavens (GAE en MAA) hebben gedetailleerde informatie over de samenstelling en inzet van het materieelpark aangeleverd, en twee andere luchthavens (Eindhoven en RTHA) alleen brandstofgegevens (als totaal). Van luchthaven Schiphol zijn geen aanvullende gegevens verkregen, waardoor deze luchthaven met veruit het grootste grondmaterieelpark ontbreekt in deze studie.

De vergelijking op het niveau van brandstoftotalen laat allereerst zien dat de huidige rapportage door de Emissieregistratie voor 2 van de luchthavens (MAA en RTHA) goed aansluit bij de door de luchthaven aangeleverde totalen. Voor Eindhoven Airport en GAE ligt de waarde van de Emissieregistratie fors hoger dan de door de luchthaven aangeleverde totalen. De Emissieregistratie-methode geeft dus niet voor alle luchthavens een representatieve inschatting van de brandstofinzet, en zal dan vermoedelijk ook afwijken op emissietotalen. Een vergelijking voor meerdere jaren zou duidelijk kunnen maken of de afwijkingen structureel zijn.

Op basis van de gedetailleerde gegevens voor luchthavens GAE en MAA is een brandstof- en emissieberekening uitgevoerd met het EMMA-model. De resultaten van deze berekening zijn vergeleken met de huidige rapportage door de Emissieregistratie en met de brandstofopgave die de luchthavens in het kader van deze studie hebben aangeleverd. Voor luchthaven MAA ligt het berekende brandstoftotaal dicht in de buurt van de huidige brandstofinschatting van de Emissieregistratie en tevens dicht bij de opgave van de luchthaven zelf (ca. 8% afwijking). Voor luchthaven GAE ligt de brandstofopgave door de luchthaven fors lager dan de berekende waarden uit de Emissieregistratie en het EMMA-model. De afwijking van het EMMA-model (ca. factor 2) is wel veel kleiner dan de rapportage door de Emissieregistratie (ca. factor 5). De berekening op basis van daadwerkelijke gegevens over het materieelpark geeft hier een betere inschatting dan de Emissieregistratie-methode.

De emissies van stoffen als NO_x, PM, THC en CO hangen sterk af van de precieze samenstelling en inzet van het materieelpark (in termen van vermogen, leeftijd en emissienormering) en van de motorbelasting en draaiuren van de machines. Zoals verwacht wijken de emissies voor sommige stoffen dan ook meer af dan de brandstoftotalen bij vergelijking tussen de huidige emissieberekening in de Emissieregistratie en de berekeningen met het EMMA-model. Voor NO_x is de afwijking respectievelijk 39% lager en 20% hoger voor luchthavens GAE en MAA, voor THC ca. 68% lager en 38% lager, en voor PM berekent het

EMMA-model ca. 18% lagere emissies voor GAE en 35% hogere emissies voor MAA dan de huidige emissiewaarden in de Emissieregistratie. Deze afwijkingen vallen binnen de onzekerheidsbandbreedte die de Emissieregistratie rapporteert voor het gehele grondmaterieelpark op luchthavens in Nederland.

Het is de verwachting dat de emissieberekening op basis van gegevens over het daadwerkelijke materieelpark nauwkeuriger resultaten oplevert dan de huidige methode in de Emissieregistratie, omdat deze aanpak beter rekening houdt met aspecten die het meest bepalend zijn voor de emissies, zoals machinekenmerken en inzet. Deze methode is daarmee geschikter voor het monitoren van eventuele emissiereductie door vernieuwing van materieel of andere maatregelen, wat met de huidige methode zeer beperkt mogelijk is. De vergelijkingen tussen de resultaten van het EMMA-model en de Emissieregistratie kunnen geen uitsluitsel geven over welke emissiewaarden het meest realistisch zijn. De globale overeenkomsten in de resultaten van de verschillende methodes geven wel vertrouwen dat de uitkomsten in beide gevallen van de juiste ordegrootte zijn. De vergelijking op brandstoftotaal toont aan dat er alsnog uitgegaan moet worden van een forse onzekerheidsbandbreedte.

De EMMA-methode is sterk afhankelijk van nauwkeurige en volledige gegevensaanlevering door de luchthavens. Daarom is het aan te bevelen dat de Nederlandse luchthavens jaarlijks een inventarisatie van het grondmaterieelpark en de inzet hiervan opmaken, zodat de emissies en toekomstige emissiereducties beter kunnen worden gemonitord. Aanvullende praktijkmetingen van emissies aan verschillende typen grondgebonden machines kunnen deze aanpak verder ondersteunen.

Tot slot is in deze studie een overzicht gemaakt van mogelijke verduurzamingsopties en -potentieel voor het grondmaterieel op Nederlandse luchthavens om hun impact op klimaat en luchtkwaliteit te verminderen. Emissies van NO_x en PM kunnen flink worden gereduceerd door retrofitting of vervanging met Stage V materieel. Alleen elektrische machines en machines met een brandstofcel op waterstof hebben geen emissies uit de uitlaat. Luchthavens zetten op dit moment in op elektrificatie om het zero CO_2-doel voor de grondgebonden activiteiten zoals opgenomen in de Luchtvaartnota 2020 te realiseren. Bij elektrificeren zijn twee varianten mogelijk: met een (verwisselbaar) accupakket of met een vaste netaansluiting. Om een gericht advies over de beste opties voor verduurzaming op te stellen, is meer informatie nodig over de specificaties en inzet van het grondmaterieel.

7 Ondertekening

Tijdsbestek waarin het onderzoek heeft plaatsgehad:
November 2022 t/m december 2023

Naam en functies van medewerkers:
- Stijn Dellaert: Medior Scientist Integrator
- Luuk van Meijer Consultant

Naam en handtekening tweede lezer:

ValidSigned by Norbert Ligterink
on 2023-12-22 13:59:12

Norbert Ligterink - Reviewer

Ondertekening: Utrecht, 21 december 2023

ValidSigned by Bart Jansen
on 2023-12-21 13:22:09

Bart Jansen
Project Manager

ValidSigned by Sam van Goethem
on 2023-12-22 15:47:52

Sam van Goethem
Research Manager

8 Literatuur

Dellaert, S.N.C. & J.H.J. Hulskotte, (2017): Emissions of air pollutants from civil aviation in the Netherlands. TNO 2017 R10055, TNO, Utrecht.

Feldbrugge, P. (2015): GSE Emission reporting: Reporting from KES AEM system. Nov. 2015.

Hulskotte, J.H.J. & R.P. Verbeek, (2009): Emissiemodel Mobiele Machines gebaseerd op machineverkopen in combinatie met brandstof Afzet (EMMA). TNO-034-UT-2009-01782_RPT-MNL. TNO Bouw en Ondergrond, Utrecht

Geilenkirchen. G.P., M. Balech, J. Hulskotte, S. Dellaert, N. Ligterink, M. Sijstermans, K. Felter, M. 't Hoen, K. Geertjes (2023): Methods for calculating the emissions of transport in the Netherlands. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague.

Mel, W., (2020): Electrification of ground support equipment. Juli, 2020.

US EPA (2022a): Speciation Profiles and Toxic Emission Factors for Nonroad Engines in MOVES3. EPA-420-R-22-015, juli 2022.

US EPA (2022b): SPECIATE 5.2. https://www.epa.gov/air-emissions-modeling/speciate

Veldt, C., van der Most, P.F.J., (1993): Emissiefactoren vluchtige organische stoffen uit verbrandingsmotoren. Publikatiereeks Emissieregistratie nr.10, april 1993.

Bijlage A

Overzicht emissies grondmaterieel

Tabel 7: Emissies grondmaterieel grote en middelgrote luchthavens volgens Emissieregistratie (voorlopige cijfers 2023), in kg

Stofnaam	Emissiejaar	Schiphol	Eindhoven Airport	RTHA	MAA	GAE
Koolstofdioxide (CO_2)	2015	25.841.965	1.182.742	572.920	277.042	80.356
	2016	25.901.373	1.276.235	574.338	262.061	68.476
	2017	26.793.351	1.446.715	556.243	333.726	81.485
	2018	28.265.504	1.498.606	592.174	532.010	89.119
	2019	26.135.741	1.580.775	623.920	580.757	62.263
	2020	17.452.197	682.949	202.328	623.210	12.951
	2021	17.452.197	778.589	257.859	651.489	20.952
	2022	20.579.352	1.497.188	604.442	519.621	38.796
Koolstofmonoxide (CO)	2015	125.310	5.735	2.778	1.343	390
	2016	124.108	6.115	2.752	1.256	328
	2017	133.700	7.219	2.776	1.665	407
	2018	152.528	8.087	3.196	2.871	481
	2019	115.445	6.983	2.756	2.565	275
	2020	66.659	2.609	773	2.380	49
	2021	66.659	2.974	985	2.488	80
	2022	78.604	5.719	2.309	1.985	148
Stikstofoxiden, als NO_2	2015	202.911	9.287	4.499	2.175	631
	2016	189.899	9.357	4.211	1.921	502
	2017	190.800	10.302	3.961	2.377	580
	2018	209.667	11.116	4.393	3.946	661
	2019	169.974	10.281	4.058	3.777	405

	2020	102.033	3.993	1.183	3.644	76
	2021	102.033	4.552	1.508	3.809	122
	2022	120.315	8.753	3.534	3.038	227
Ammoniak (NH_3)	2015	81,5	3,7	1,8	0,9	0,3
	2016	81,6	4,0	1,8	0,8	0,2
	2017	84,5	4,6	1,8	1,1	0,3
	2018	91,2	4,8	1,9	1,7	0,3
	2019	86,5	5,2	2,1	1,9	0,2
	2020	59,2	2,3	0,7	2,1	0,0
	2021	59,2	2,6	0,9	2,2	0,1
	2022	69,8	5,1	2,1	1,8	0,1
Distikstofoxide (N_2O)	2015	1.099,6	50,3	24,4	11,8	3,4
	2016	1.102,1	54,3	24,4	11,2	2,9
	2017	1.140,1	61,6	23,7	14,2	3,5
	2018	1.231,1	65,3	25,8	23,2	3,9
	2019	1.167,3	70,6	27,9	25,9	2,8
	2020	799,5	31,3	9,3	28,5	0,6
	2021	799,5	35,7	11,8	29,8	1,0
	2022	942,7	68,6	27,7	23,8	1,8
Elementair koolstof (EC2.5)	2015	4.471,7	204,7	99,1	47,9	13,9
	2016	4.204,6	207,2	93,2	42,5	11,1
	2017	4.316,6	233,1	89,6	53,8	13,1
	2018	4.763,6	252,6	99,8	89,7	15,0
	2019	3.222,1	194,9	76,9	71,6	7,7
	2020	1.642,5	64,3	19,0	58,7	1,2
	2021	1.642,5	73,3	24,3	61,3	2,0
	2022	1.936,8	140,9	56,9	48,9	3,7
Koolwaterstoffen (THC)	2015	29.735,0	1,360.9	659,2	318,8	92,5
	2016	28.411,0	1,399.9	630,0	287,5	75,1
	2017	29.080,6	1,570.2	603,7	362,2	88,4
	2018	32.781,3	1,738.0	686,8	617,0	103,4

	2019	25.417,7	1,537.3	606,8	564,8	60,6
	2020	15.160,4	593.3	175,8	541,4	11,3
	2021	15.160,4	676.3	224,0	565,9	18,2
	2022	17.876,8	1.300,6	525,1	451,4	33,7
Fijnstof (PM10)	2015	9.140,0	418.3	202,6	98,0	28,4
	2016	8.594,0	423.5	190,6	87,0	22,7
	2017	8.822,9	476.4	183,2	109,9	26,8
	2018	9.736,5	516.2	204,0	183,3	30,7
	2019	6.585,9	398,3	157,2	146,3	15,7
	2020	3.357,2	131,4	38,9	119,9	2,5
	2021	3.357,2	149,8	49,6	125,3	4,0
	2022	3.958,7	288,0	116,3	100,0	7,5
Fijnstof (PM2,5)	2015	8.683,0	397,4	192,5	93,1	27,0
	2016	8.164,3	402,3	181,0	82,6	21,6
	2017	8.381,8	452,6	174,0	104,4	25,5
	2018	9.249,7	490,4	193,8	174,1	29,2
	2019	6.256,6	378,4	149,4	139,0	14,9
	2020	3.189,3	124,8	37,0	113,9	2,4
	2021	3.189,3	142,3	47,1	119,1	3,8
	2022	3.760,8	273,6	110,5	95,0	7,1
Zwaveldioxide (SO_2)	2015	163,0	7,5	3,6	1,7	0,5
	2016	163,0	8,0	3,6	1,6	0,4
	2017	168,1	9,1	3,5	2,1	0,5
	2018	182,2	9,7	3,8	3,4	0,6
	2019	172,7	10,4	4,1	3,8	0,4
	2020	118,3	4,6	1,4	4,2	0,1
	2021	118,3	5,3	1,7	4,4	0,1
	2022	139,4	10,1	4,1	3,5	0,3

Bijlage B

Tabellen ZZS – GAE en MAA

Tabel 8: Berekende emissies VOS componenten, PAKs en ZZS voor grondmaterieel luchthaven GAE, 2022, in kg,

Stofnaam	CAS-nummer	ZZS stofklasse voor luchtemissies[6]	ER huidig	EMMA-model huidige samenstelling	EMMA-model STAGE V	Ratio EMMA/ER
1,3-butadiene	106-99-0	MVP 2		2,3E-02	2,0E-03	
2,2,4-trimethylpentane	540-84-1			1,0E-01	1,2E-02	
Acetaldehyde	75-07-0	MVP 2		1,0E+00	1,4E-01	
Acrolein	107-02-8		4,9E-01	3,4E-01	2,3E-02	71%
Benzene	71-43-2	MVP 2	6,5E-01	3,5E-01	5,8E-02	55%
Crotonaldehyde	4170-30-3	MVP 1		3,0E-01	3,6E-02	
Ethene	74-85-1		3,9E+00	2,3E+00	2,9E-01	58%
Ethyl Benzene	100-41-4			1,0E-01	1,2E-02	
Formaldehyde	50-00-0	MVP 2	1,9E+00	2,9E+00	3,4E-01	147%
Hexane	110-54-3			2,2E-02	1,2E-03	
Isobutane	75-28-5	MVP 2		2,2E-02	1,6E-02	
Isoprene	78-79-5	MVP 2		9,0E-03	0,0E+00	
Isopropylbenzene	98-82-8	gO,2		3,6E-02	3,8E-03	
Methane	74-82-8		1,3E+00	3,1E-01	1,5E-01	23%
N-butane	106-97-8	MVP 2		5,2E-02	1,0E-02	
Propionaldehyde	123-38-6			2,0E-01	2,5E-02	
Toluene	108-88-3		4,7E-01	2,3E-01	5,4E-02	49%
Xylenes	108-38-3; 106-42-3; 95-47-6		6,5E-01	2,5E-01	6,9E-02	38%
Acenapthene	83-32-9	MVP 1		1,1E-02	6,5E-04	
Acenapthylene	208-96-8	MVP 1		8,2E-03	1,3E-03	

[6] Stoffen met stofklasse MVP 1, MVP 2, gO.2 of ERS staan op de ZZS lijst

Stofnaam	CAS-nummer	ZZS stofklasse voor luchtemissies[6]	ER huidig	EMMA-model huidige samenstelling	EMMA-model STAGE V	Ratio EMMA/ER
Anthracene	120-12-7	MVP 1	8,8E-04	1,4E-03	1,0E-04	160%
Benz(a)anthracene	56-55-3	MVP 1	2,1E-04	8,2E-05	1,2E-05	39%
Benzo(a)pyrene	50-32-8	MVP 1	1,9E-04	2,2E-05	7,1E-07	12%
Benzo(b)fluoranthene	205-99-2	MVP 1	1,6E-04	3,3E-05	1,0E-06	21%
Benzo(ghi)perylene	191-24-2	MVP 1	6,1E-05	4,7E-05	6,7E-06	77%
Benzo(k)fluoranthene	207-08-9	MVP 1	7,8E-05	2,5E-05	8,0E-07	33%
Chrysene	218-01-9	MVP 1	6,1E-04	1,0E-04	1,0E-05	16%
Dibenz(a,h)anthracene	53-70-3	MVP 1		8,9E-06	1,1E-07	
Fluoranthene	206-44-0	MVP 1	1,3E-03	8,6E-04	1,7E-04	64%
Fluorene	86-73-7	MVP 1		1,4E-02	8,7E-04	
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	193-39-5	MVP 1	3,4E-08	2,2E-05	6,5E-07	65.798%
Napthalene	91-20-3	MVP 1	8,1E-02	4,4E-02	7,0E-03	55%
Phenanthrene	85-01-8	MVP 1	1,1E-02	2,2E-02	1,5E-03	189%
Pyrene	129-00-0	MVP 1		1,5E-03	1,5E-04	
Dioxinen (PCDD/PCDF, I-TEQ)		ERS	3,4E-09	7,2E-10	3,7E-10	21%

[2] Stoffen met stofklasse MVP 1, MVP 2, gO,2 of ERS staan op de ZZS lijst

Tabel 9: Berekende emissies VOS componenten, PAKs en ZZS voor grondmaterieel luchthaven MAA, 2021, in kg,

Stofnaam	CAS-nummer	ZZS stofklasse voor luchtemissies[7]	ER huidig	EMMA-model huidige samenstelling	EMMA-model STAGE V	Ratio EMMA/ER
1,3-butadiene	106-99-0	MVP 2		7,5E-01	1,1E-02	
2,2,4-trimethylpentane	540-84-1			3,2E+00	1,8E-01	
Acetaldehyde	75-07-0	MVP 2		3,5E+01	1,8E+00	
Acrolein	107-02-8		8,1E+00	1,0E+01	2,1E-01	126%
Benzene	71-43-2	MVP 2	1,1E+01	1,3E+01	2,7E-01	124%
Crotonaldehyde	4170-30-3	MVP 1		1,1E+01	1,6E-01	
Ethene	74-85-1		6,5E+01	7,5E+01	4,3E+00	115%
Ethyl Benzene	100-41-4			3,0E+00	3,7E-01	
Formaldehyde	50-00-0	MVP 2	3,3E+01	9,8E+01	2,7E+00	300%
Hexane	110-54-3			5,7E-01	4,2E-02	
Isobutane	75-28-5	MVP 2		1,2E+00	4,1E-01	
Isoprene	78-79-5	MVP 2		2,7E-01	0,0E+00	
Isopropylbenzene	98-82-8	g0,2		9,1E-01	1,7E-01	
Methane	74-82-8		2,3E+01	1,5E+01	2,0E+00	65%
N-butane	106-97-8	MVP 2		1,9E+00	1,6E-01	
Propionaldehyde	123-38-6			7,3E+00	1,9E-01	
Toluene	108-88-3		7,9E+00	9,1E+00	7,7E-01	115%
Xylenes	108-38-3; 106-42-3; 95-47-6		1,1E+01	7,3E+00	2,5E+00	68%
Acenapthene	83-32-9	MVP 1		3,3E-01	3,2E-03	
Acenapthylene	208-96-8	MVP 1		3,1E-01	6,0E-03	
Anthracene	120-12-7	MVP 1	1,5E-02	4,2E-02	7,1E-04	288%
Benz(a)anthracene	56-55-3	MVP 1	3,5E-03	2,9E-03	1,7E-04	82%
Benzo(a)pyrene	50-32-8	MVP 1	3,1E-03	7,2E-04	5,8E-06	23%
Benzo(b)fluoranthene	205-99-2	MVP 1	2,6E-03	1,1E-03	6,7E-06	42%
Benzo(ghi)perylene	191-24-2	MVP 1	1,0E-03	1,8E-03	2,9E-05	180%
Benzo(k)fluoranthene	207-08-9	MVP 1	1,3E-03	8,3E-04	5,3E-06	64%

[7] Stoffen met stofklasse MVP 1, MVP 2, g0.2 of ERS staan op de ZZS lijst

Stofnaam	CAS-nummer	ZZS stofklasse voor luchtemissies[E]	ER huidig	EMMA-model huidige samenstelling	EMMA-model STAGE V	Ratio EMMA/ER
Chrysene	218-01-9	MVP 1	1,0E-02	3,4E-03	8,2E-05	34%
Dibenz(a,h)anthracene	53-70-3	MVP 1		2,2E-04	1,2E-06	
Fluoranthene	206-44-0	MVP 1	2,3E-02	3,5E-02	1,1E-03	156%
Fluorene	86-73-7	MVP 1		4,3E-01	5,0E-03	
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	193-39-5	MVP 1	5,7E-07	7,1E-04	3,9E-06	125.729%
Napthalene	91-20-3	MVP 1	1,4E+00	1,5E+00	8,8E-02	112%
Phenanthrene	85-01-8	MVP 1	1,9E-01	6,5E-01	1,1E-02	338%
Pyrene	129-00-0	MVP 1		5,0E-02	9,0E-04	
Dioxinen (PCDD/PCDF, I-TEQ)		ERS	5,7E-08	1,8E-08	1,4E-08	32%

Energy & Materials Transition

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
www.tno.nl

TNO innovation for life