

RAPPORT

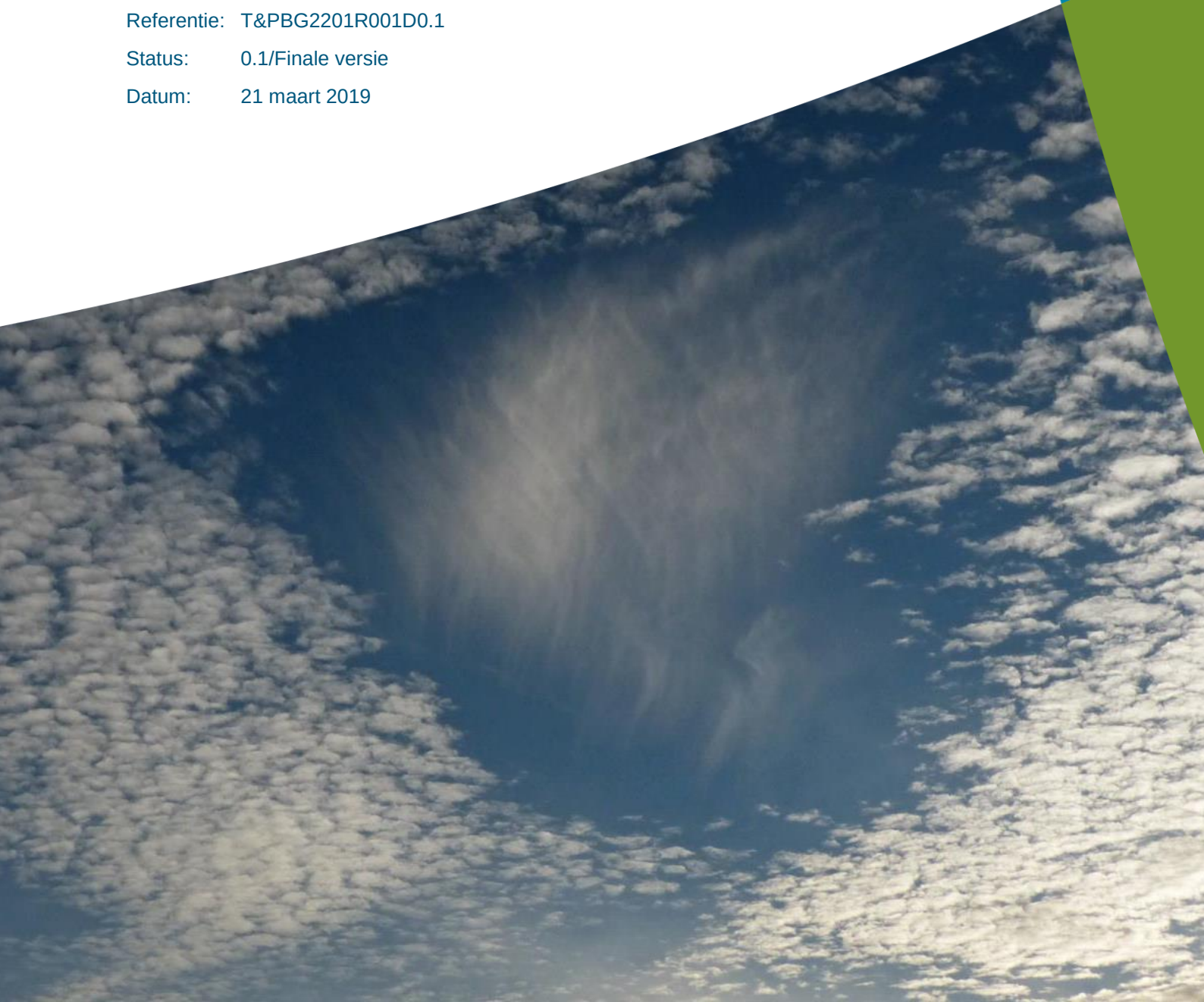
Emissiereductiepotentieel in de Nederlandse Luchtvaart

Klant: Natuur & Milieu

Referentie: T&PBG2201R001D0.1

Status: 0.1/Finale versie

Datum: 21 maart 2019



HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.

Laan 1914 no.35
3818 EX AMERSFOORT
Netherlands
Transport & Planning
Trade register number: 56515154

+31 88 348 20 00 **T**
+31 33 463 36 52 **F**
info@rhdhv.com **E**
royalhaskoningdhv.com **W**

Titel document: Emissiereductiepotentieel in de Nederlandse Luchtvaart

Referentie: T&PBG2201R001D0.1
Status: 0.1/Finale versie
Datum: 21 maart 2019
Projectnaam: Emissiereductie Luchtvaart
Projectnummer: BG2201
Auteur(s): Maarten van den Berg, Jorrit Zuidema, Frederik Oudman, Christine Driessen

Opgesteld door: Maarten van den Berg

Gecontroleerd door: Ronald Groen

Datum/Initialen:

Goedgekeurd door: Geertje Hegeman

Datum/Initialen:

Classificatie

Open



Disclaimer

No part of these specifications/printed matter may be reproduced and/or published by print, photocopy, microfilm or by any other means, without the prior written permission of HaskoningDHV Nederland B.V.; nor may they be used, without such permission, for any purposes other than that for which they were produced. HaskoningDHV Nederland B.V. accepts no responsibility or liability for these specifications/printed matter to any party other than the persons by whom it was commissioned and as concluded under that Appointment. The integrated QHSE management system of HaskoningDHV Nederland B.V. has been certified in accordance with ISO 9001:2015, ISO 14001:2015 and OHSAS 18001:2007.

Inhoud

1	Aanleiding en doel van deze studie	3
2	Methodiek	5
2.1	Baseline ontwikkeling CO ₂ -emissies Nederlandse luchtvaart	5
2.2	Geïdentificeerde CO ₂ -reductiemaatregelen	7
2.3	Berekening CO ₂ -emissiereductiepotentieel	7
3	Resultaten en conclusies	9
3.1	CO ₂ -reductiepotentieel energiedragers en technische- en procesmaatregelen	10
3.2	Effect maatregelen op overige klimaatimpact van vliegverkeer	11
3.3	Conclusies	11
Bijlage - Uitwerking maatregelen in factsheets		13
	1) Biobrandstoffen	13
	2) Power to liquid	16
	3) Hybride elektrisch vliegen	19
	4) Volledig elektrisch vliegen	21
	5) Airside electric operations (taxiën)	23
	6) Efficiëntieverbeteringen	25
	7) Propellervliegtuigen	27
	8) Versneld schonere vliegtuigen inzetten	29
	9) Aanpassen van start- en land procedures (glijvlucht)	31
	10) Optimaal Air Traffic Management	33

1 Aanleiding en doel van deze studie

De broeikasgasuitstoot van de luchtvaartsector in de EU was in 2016 goed voor bijna 4% van de totale broeikasgasuitstoot. In Nederland was dat in hetzelfde jaar zelfs 6%¹. Dit aandeel wordt naar verwachting snel groter, omdat de sector blijft groeien terwijl er geen maatregelen voor handen zijn die de komende vijf à tien jaar op grote schaal tot CO₂-reductie binnen de luchtvaartsector zelf leiden.

In het kader van het nationale klimaatakkoord vinden op dit moment gesprekken plaats tussen stakeholders uit de luchtvaartsector. Een belemmering hierbij is dat onduidelijk is hoeveel CO₂ in de Nederlandse luchtvaartsector vermeden kan worden en op welke termijn dit haalbaar is. Een kwantitatief overzicht van het CO₂-emissiereductiepotentieel van verschillende maatregelen ontbreekt.

Tegen deze achtergrond heeft Natuur & Milieu aan Royal HaskoningDHV gevraagd inzichtelijk te maken welke technische- en procesmaatregelen de klimaatimpact van de luchtvaart kunnen verminderen en in welke mate, tussen nu en 2050. Het **doel** van de studie is om beleidsmakers en andere stakeholders een overzicht te geven van de effectiviteit en haalbaarheid van verschillende maatregelen voor het reduceren van de klimaatimpact van de luchtvaartsector in 2030 en 2050.

Aanpak en afbakening

Een literatuuronderzoek is uitgevoerd, aangevuld met een consultatie van experts, waarmee de huidige stand van kennis wordt weergegeven van:

- de maatregelen die genomen kunnen worden om de klimaatimpact van de Nederlandse luchtvaart te verminderen. Hierbij is gekeken naar:
 - Energiedragers;
 - Technische maatregelen;
 - Procesmaatregelen.
- de verwachte effecten van deze maatregelen in 2030 en in 2050.

Over een aantal maatregelen is veel literatuur beschikbaar, over andere minder. Gezocht is naar studies die zo recent mogelijk zijn en zo goed mogelijk aansluiten op de Nederlandse dan wel Europese context. Hoewel gepoogd is per maatregel de meest actuele en relevante literatuur te raadplegen, lag een volledige review van beschikbare literatuur buiten de scope van deze studie.

Beoordeling van effecten

De maatregelen zijn individueel beoordeeld ten opzichte van de verwachte ontwikkeling in CO₂-emissies (de *baseline*) waarin géén maatregelen worden getroffen. Daarbij is het belangrijk om te realiseren dat veel maatregelen een onderlinge samenhang hebben, waardoor reductiepotentiëlen van de maatregelen niet zomaar bij elkaar opgeteld kunnen worden (zie kader 1). In deze studie besteden we daar extra aandacht aan, om te voorkomen dat verkeerde verwachtingen worden gewekt. De in deze studie gevonden CO₂-reductiepotentiëlen geven dan ook een indicatie van de mogelijkheden die de verschillende maatregelen afzonderlijk bieden om de klimaatimpact van de Nederlandse luchtvaart tussen nu en 2030/2050 te beperken. Om het totale CO₂-reductiepotentieel en groeipad van de maatregelen tezamen te bepalen is een techno-economische scenarioanalyse nodig. Dit valt buiten de scope van deze studie.

Naast de uitstoot van CO₂ zorgt vliegverkeer op andere manieren voor klimaatimpact, onder andere door de invloed op wolkenvorming en op de vorming van ozon. Hierover is wel literatuur beschikbaar, maar het netto-effect van maatregelen op de niet-CO₂ impact van vliegverkeer is daaruit onvoldoende af te leiden.

¹ <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer>

Vanwege de complexiteit en het prille stadium waarin het onderzoek naar de niet-CO₂ bijdrage van duurzame luchtvaartbrandstoffen zich bevindt, wordt de niet-CO₂ klimaatimpact van de maatregelen alleen kwalitatief beschreven. In hoofdstuk 2 is hier een nadere toelichting op gegeven.

Waarom zijn de reductiepotentiëlen van de maatregelen niet allemaal bij elkaar op te tellen?

De reductiepotentiëlen van de afzonderlijke maatregelen kunnen niet allemaal bij elkaar opgeteld worden om tot een totaal reductiepotentieel voor de Nederlandse luchtvaart te komen. Dit heeft twee redenen:

- 1) Een aantal **technische- en procesmaatregelen** overlapt elkaar gedeeltelijk, bijvoorbeeld: *Aanpassen van start- en landprocedures* is ook een onderdeel van *Optimaal Air Traffic Management* en *Propellervliegtuigen* kunnen ook deel uitmaken van *Efficiëntieverbeteringen*.
- 2) De benutting van het reductiepotentieel van de ene maatregel leidt tot een kleiner reductiepotentieel van de andere maatregelen. Bijvoorbeeld: *Hybride elektrisch vliegen* leidt tot minder CO₂-uitstoot per vlucht, waardoor het CO₂-besparingseffect van *Optimaal Air Traffic Management* kleiner wordt.

Kader 1

Leeswijzer

In hoofdstuk 2 zijn de werkwijze en uitgangspunten nader beschreven, evenals de gehanteerde baseline CO₂-emissies. In hoofdstuk 3 zijn de resultaten en conclusies samengevat. De uitwerking per maatregel is beschreven in de Bijlage in de vorm van factsheets.

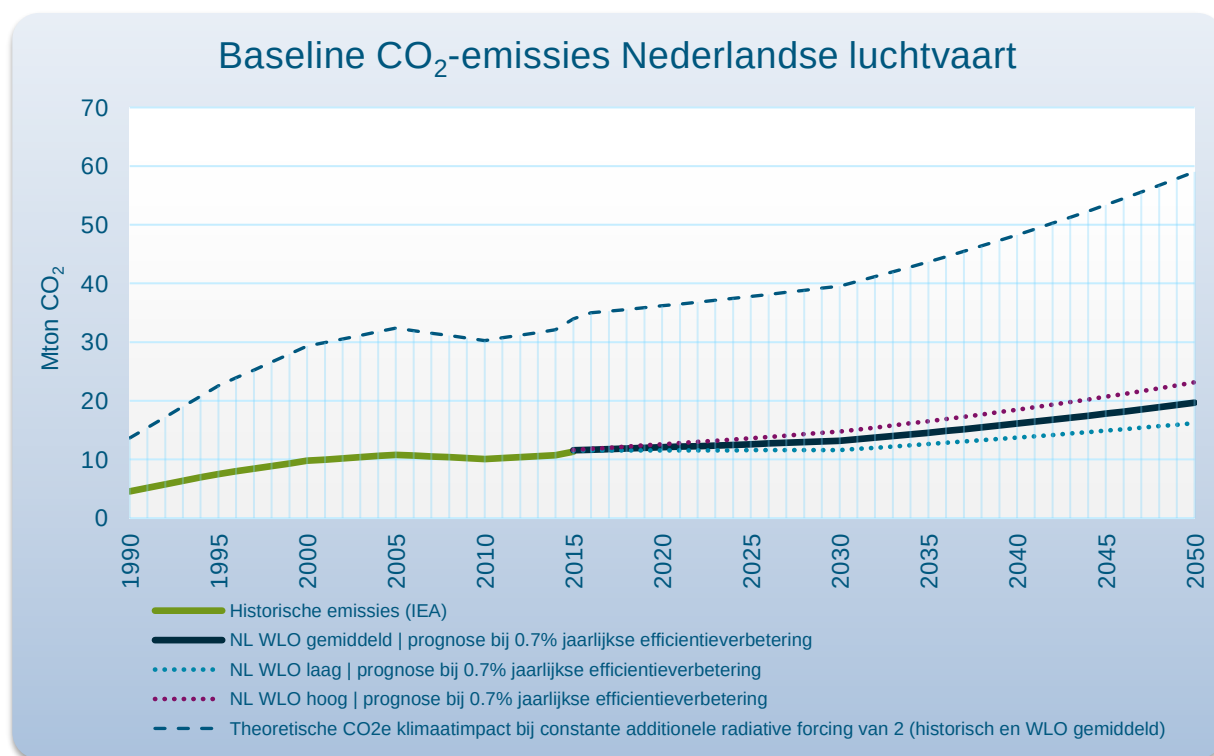
2 Methodiek

Om inzicht te verschaffen in het CO₂-reductiepotentieel in de Nederlandse luchtvaart zijn de volgende stappen doorlopen:

1. Het bepalen van de verwachte groei van CO₂-emissies in de Nederlandse luchtvaart, de *baseline*.
2. Het identificeren en selecteren van energiedragers en technische- en procesmaatregelen die tot CO₂-reductie in de luchtvaart kunnen leiden.
3. Het berekenen van het CO₂-reductiepotentieel van de maatregelen op basis van literatuuronderzoek en het raadplegen van deskundigen.

2.1 Baseline ontwikkeling CO₂-emissies Nederlandse luchtvaart

De baseline CO₂-emissie van de Nederlandse luchtvaart is afkomstig uit een studie van CE Delft² (zie Figuur 1). Hierin zijn de historische CO₂-emissies (1990 t/m 2015) afkomstig van het Internationaal Energieagentschap (IEA)³. De emissies representeren *alleen* de CO₂-emissies door brandstofverbruik voor *vertrekkende* internationale vluchten ("international aviation bunkers"). Hieronder vallen zowel passagiers- als vrachtluchten. De CO₂-emissies zijn dus representatief voor de gehele vlucht. Andere brandstoffen die gebruikt worden op luchthavens vallen hier niet onder en ook emissies van binnenlandse vluchten zitten niet in deze cijfers. Het aandeel 'domestic' is in Nederland echter verwaarloosbaar (<1%). De uitstoot van niet-CO₂ broeikasgassen blijft hierin eveneens buiten beschouwing. Een indicatie van de totale klimaatimpact (zie kader 2) is wel gegeven in onderstaande grafiek. Over de grootte van het niet aan CO₂ gerelateerde klimaateffect en de wijze waarop dit kan worden vastgesteld, bestaat nog geen wetenschappelijke consensus⁴.



Figuur 1, baseline emissies Nederlandse luchtvaart (bron baseline data: CE Delft)

² Ontwikkelingen Nederlandse luchtvaart. CE Delft, juni 2018

³ CO₂ emissions from fuel combustion. IEA, 2017.

⁴ <http://www.co2offsetresearch.org/aviation/RFI.html>

Niet-CO₂ bijdrage van vliegen aan klimaatimpact

Aanvullend op de klimaatimpact van de CO₂-uitstoot door verbranding van kerosine, draagt vliegverkeer ook bij aan de opwarming van de aarde door onder andere de vorming van cirrusbewolking en ozon¹. Deze aanvullende klimaateffecten zijn in tegenstelling tot die van CO₂ relatief van korte duur (1 – 10 jaar). De aanvullende bijdrage aan de opwarming (uitgedrukt als radiative forcing (RF) in W/m²) is desalniettemin significant en werd door het IPCC in 1999 geschat op het dubbele van de CO₂-emissies¹ (RF CO₂ = 1, aanvullende RF = 2, totale RF = 3). In 2007 stelde het IPCC echter óók dat dit principe niet gebruikt moet worden om de totale klimaatimpact van vliegen vast te stellen, omdat het de verschillende atmosferische verblijftijden van de 'forcing agents' niet meeneemt⁴.

Het is eveneens te kort door de bocht om de CO₂-reductie door besparing op kerosine gelijk te stellen aan de reductie op de overige klimaatimpacts van vliegen. Als de kerosinebesparing tijdens taxiën plaatsvindt, of in de LTO (Landing & Take-off) cyclus, dan is er géén of een kleinere niet-CO₂ klimaatimpact-reductie dan wanneer kerosineverbruik op kruishoogte wordt bespaard. Ook kunnen biobrandstoffen een andere (en mogelijk lagere) impact hebben op de niet-CO₂ bijdrage aan de opwarming dan conventionele vliegtuigbrandstoffen. Vanwege de complexiteit en het prille stadium van het onderzoek naar de effecten van biobrandstoffen, wordt de niet-CO₂ bijdrage van de maatregelen alleen kwalitatief beschreven.

Kader 2

Voor het bepalen van de ontwikkeling van CO₂-emissies in de Nederlandse luchtvaart vanaf 2015 heeft CE Delft gebruik gemaakt van de "gerestricteerde WLO hoog- en gerestricteerde WLO laag scenario's"⁵, welke zijn opgesteld door het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) en het Centraal Planbureau (CPB). WLO hoog combineert een relatief hoge bevolkingsgroei met een hoge economische groei van ongeveer 2% per jaar. In WLO laag gaat een beperkte demografische ontwikkeling samen met een gematigde economische groei van ongeveer 1% per jaar.

Met 'gerestricteerd' wordt bedoeld op geluidscapaciteitsbeperkingen op de Nederlandse luchthavens. Voor Schiphol geldt tot 2020 een plafond van 500.000 vluchten per jaar. Voor de vliegruimte in de periode daarna is door PBL/CPB met het Aeolus luchtvaartmodel een schatting gemaakt. Daarbij wordt onder meer rekening gehouden met het stiller worden van vliegtuigen en de 50/50-afspraken, wat betekent dat geluidruimte die vrijkomt door stillere vliegtuigen voor 50% mag worden ingezet voor extra vluchten.

Enkele kenmerken van de WLO-scenario's die invloed hebben op de CO₂-emissie zijn⁶:

- **Capaciteitsrestrictie.** In beide scenario's wordt rekening gehouden met een restrictie van de groei door capaciteitsbeperkingen op de Nederlandse luchthavens (met name Schiphol). Voor WLO laag komt dit neer op een groei van 10.000 vluchten per 10 jaar en voor WLO hoog op 125.000 vluchten per 10 jaar.
- **CO₂ prijs.** In het WLO laag scenario wordt uitgegaan van een CO₂-prijs op intra-Europese vluchten die oploopt van EUR 4,40 in 2013 tot EUR 40,60 in 2050. In het WLO hoog scenario is er een wereldwijde CO₂-prijs die oploopt tot EUR 162,40 in 2050 voor alle vluchten.

⁵ CPB/PBL 2016, WLO – Welvaart en Leefomgeving. Mobiliteit – Luchtvaart, achtergronddocument.

⁶ Zie CPB/PBL 2016 voor verdere details

- **Efficiëntieverbeteringen.** In de WLO-scenario's wordt uitgegaan van 1,5% (WLO laag) en 2,0% (WLO hoog) brandstofefficiëntieverbetering per passagierskilometer per jaar. Om de afvlakkende trend van de afgelopen jaren te weerspiegelen heeft CE Delft deze waarde voor beide scenario's gecorrigeerd naar 0,7%. Dit komt overeen met de gemiddelde efficiëntieverbetering in de periode 2010 – 2015⁷.

Behalve de capaciteitsrestricties en de door het EU ETS beïnvloede CO₂-prijs is door PBL/CPB geen milieubeleid voor de luchtvaart in de scenario's opgenomen. In deze studie wordt het reductiepotentieel van de CO₂-besparingsmaatregelen afgezet tegen het *gemiddelde* van de WLO laag en WLO hoog baseline ontwikkelingen met de door CE Delft gecorrigeerde efficiëntieverbetering (zie Figuur 1).

2.2 Geïdentificeerde CO₂-reductiemaatregelen

Voor de luchtvaart bestaan meerdere energiedragers en technische- en procesmaatregelen die op verschillende manieren bij kunnen dragen aan het beperken van de klimaatimpact van de luchtvaart. Sommige maatregelen, zoals efficiëntieverbeteringen en biobrandstoffen, worden reeds toegepast en kunnen worden opgeschaald. Andere maatregelen, zoals Power to liquid en volledig elektrisch vliegen, hebben potentie maar zijn het komende decennium nog niet op grote schaal commercieel inzetbaar. In deze deskstudie wordt een zo compleet mogelijk beeld gegeven van het CO₂-reductiepotentieel binnen de luchtvaart. Op basis van literatuurstudie en gesprekken met experts zijn de alternatieve energiedragers en technische- en procesmaatregelen als volgt gegroepeerd:

- Biobrandstoffen
- Power to liquid
- Hybride elektrisch vliegen
- Volledig elektrisch vliegen (batterij of waterstof met brandstofcel)
- Airside electric operations (taxiën)
- Efficiëntieverbeteringen
- Propellervliegtuigen
- Versneld schonere vliegtuigen inzetten
- Aanpassen van start- en land procedures (glijvlucht)
- Optimaal Air Traffic Management

De maatregelen zijn in de Bijlage nader beschreven. Naast alternatieve energiedragers en technische- en procesmaatregelen wordt in de literatuur en het klimaatdebat ook gesproken over beleidsmaatregelen, zoals het EU-ETS, CORSIA en beprijzen. Dergelijke instrumenten zijn nodig om het CO₂-reductiepotentieel van de hier besproken technische- en procesmaatregelen te realiseren. De reikwijdte van deze beleidsmaatregelen zelf maakt geen onderdeel uit van de studie. Ook de maatregel 'stimuleren van treinreizen' valt buiten de scope van deze analyse omdat het ingrijpt op de vraag naar vliegen en niet op de CO₂-emissiereductie van het vliegen zelf. In een eerdere studie van RHDHV, 'Vergelijk vliegen met treinreizen voor korte afstanden', is het potentieel van deze maatregel wel onderzocht.

2.3 Berekening CO₂-emissiereductiepotentieel

Het CO₂-reductiepotentieel van elke maatregel is afgezet tegen de baseline ontwikkeling van de Nederlandse luchtvaartsector (zie paragraaf 2.1 voor een toelichting op de baseline). Per maatregel is op basis van literatuuronderzoek en consultatie van experts onderzocht wanneer de maatregel effect sorteert

⁷ Fuel efficiency trends for new commercial jet aircraft: 1960 to 2014, The ICCT 2015

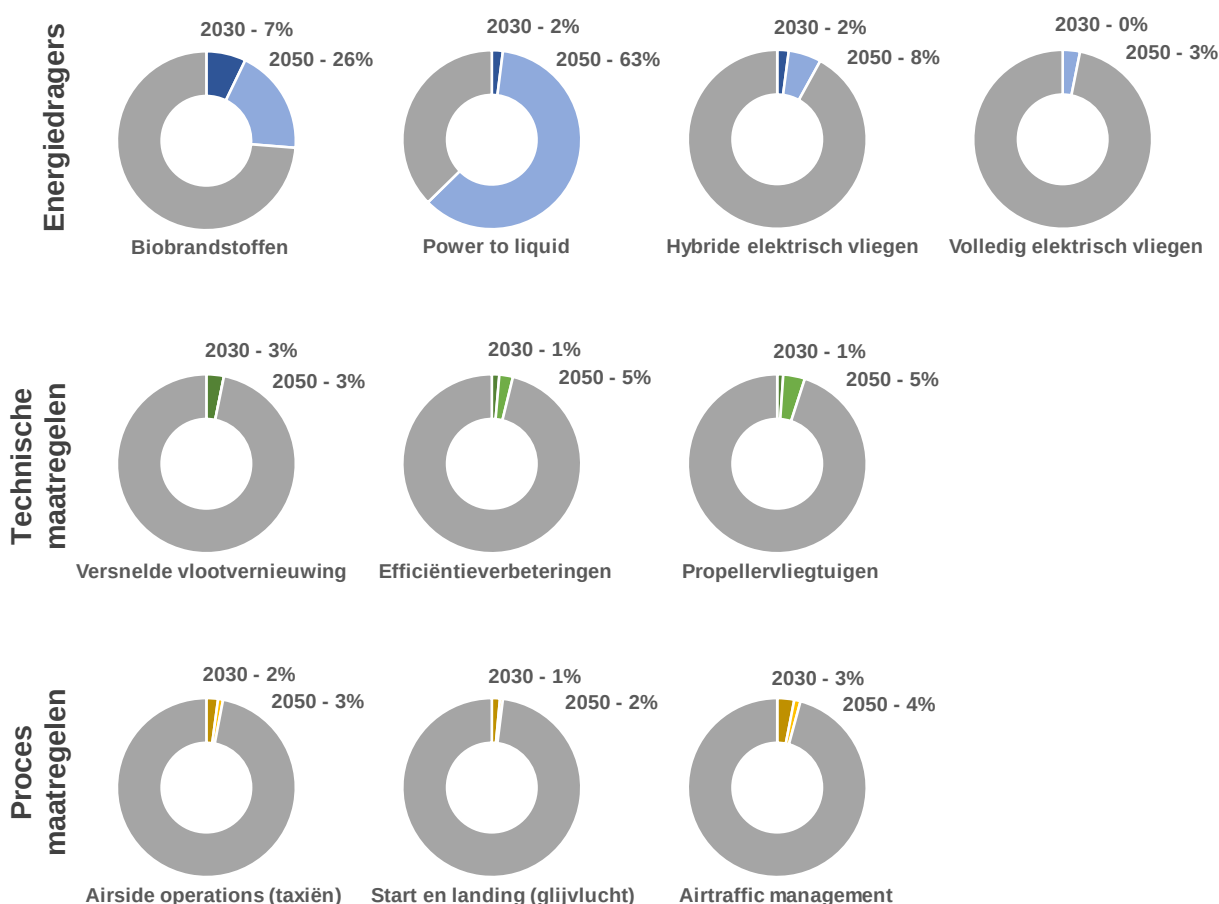
en hoeveel CO₂-reductie ten opzichte van de baseline in 2020, 2025, 2030, 2040 en 2050 maximaal bereikt kan worden. Onder 'maximaal' wordt verstaan wat technisch mogelijk is, rekening houdend met de tijd die nodig is voor ontwikkeling van de benodigde technologie (bijvoorbeeld voldoende hoge energiedichtheid van batterijen voor elektrisch vliegen), het opschalen van productiecapaciteit en sector wijde implementatie. In de analyse van het CO₂-reductiepotentieel wordt geen rekening gehouden met de benodigde investeringen, het is geen economische haalbaarheidsstudie. Om de technische haalbaarheid in perspectief te plaatsen wordt in de Bijlage bij de uitwerking van de energiedragers (die het grootste reductiepotentieel vertegenwoordigen) een indicatie van de prijs per vermeden ton CO₂ gegeven.

3 Resultaten en conclusies

De potentiële bijdrage van tien technische- en procesmaatregelen aan het verminderen van de klimaatimpact van vliegverkeer zijn onderzocht. Ten opzichte van de baseline CO₂-emissies, waarin 'normale' ontwikkelingen zijn meegenomen, is per maatregel de ontwikkeling van het CO₂-reductiepotentieel tussen nu en 2050 bepaald. Hiervoor is literatuuronderzoek gedaan en zijn experts geraadpleegd. Het CO₂-reductiepotentieel per maatregel verschilt van enkele procenten tot ruim 60% in 2050 (zie

Figuur 2 en paragraaf 3.1). Het klimaatimpact-reductiepotentieel van de individuele maatregelen wordt in paragraaf 3.2 kwalitatief besproken. Het gecombineerde CO₂- en klimaatimpact-reductiepotentieel van de maatregelen is afhankelijk van vele factoren en niet onderzocht. Het CO₂-reductiepotentieel van de individuele maatregelen kan niet worden opgeteld.

Emissiereductiepotentieel in de Nederlandse luchtvaart



Figuur 2, overzicht CO₂-reductiepotentieel in 2030 en 2050 voor de tien onderzochte maatregelen ten opzichte van de baseline. Hoe verder in de toekomst hoe groter de onzekerheid van het getoonde 'technisch maximale' reductiepotentieel. NB: de maatregelen kunnen niet bij elkaar worden opgeteld vanwege gedeeltelijke overlap (zie kader 1).

3.1 CO₂-reductiepotentieel energiedragers en technische- en procesmaatregelen

Figuur 2 toont tien veel besproken energiedragers en technische- en procesmaatregelen waarmee de klimaatimpact van de luchtvaartsector kan worden beperkt (in de bijlage worden de CO₂-reductie groeipaden van de maatregelen in meer detail in grafieken getoond). Per maatregel is aangegeven welk percentage van de baseline CO₂-emissie vermeden kan worden in 2030 en 2050.

Navolgend wordt het resultaat per maatregel kort beschreven. De volgorde van de maatregelen is gebaseerd op het CO₂-reductiepotentieel in 2030 (oplopend van klein naar groot).

- **Volledig elektrisch vliegen.** Vanwege de hoge energiedichtheid van batterijen die nodig is om volledig elektrisch vliegen met passagiersvliegtuigen mogelijk te maken duurt het zeker twee decennia voordat dit mogelijk is. In 2030 kan hiermee nog geen CO₂-reductie bereikt worden en in 2050 3% (na introductie in 2045).
- **Propellervliegtuigen.** Propellervliegtuigen zijn over het algemeen efficiënter met brandstofverbruik maar vliegen langzamer dan straalvliegtuigen en produceren meer geluid. Bij inzet op Europese vluchten kan 1% in 2030 en 5% in 2050 gereduceerd worden ten opzichte van de baseline CO₂-emissie.
- **Efficiëntieverbeteringen.** De brandstofefficiëntie per passagierskilometer wordt elk jaar iets beter. Omdat dit effect al zit verwerkt in de baseline is het resterend CO₂-reductiepotentieel van deze maatregel beperkt. Versnelling van de ingebruikname van efficiëntere motoren, betere aerodynamica, het gebruik van lichtere materialen en het verhogen van de bezettingsgraad kan nog 1% reductie in 2030 en 4% reductie in 2050 opleveren ten opzichte van de baseline CO₂-emissie.
- **Aanpassen van start- en land procedures.** Met optimaal starten en landen vanuit het perspectief van brandstofverbruik kan 1% in 2030 en 2% in 2050 gereduceerd worden ten opzichte van de baseline CO₂-emissie.
- **Airside electric operations (taxiën).** Met volledig elektrisch taxiën kan 1% in 2030 en 2% in 2050 gereduceerd worden ten opzichte van de baseline CO₂-emissie.
- **Hybride elektrisch vliegen.** Een hybride elektrisch vliegtuig wordt deels met elektrische energie en deels met verbrandingsenergie aangedreven. Dit is eerder mogelijk op grote schaal dan volledig elektrisch vliegen. Bij inzet op Europese vluchten kan 2% in 2030 en 8% in 2050 gereduceerd worden ten opzichte van de baseline CO₂-emissie.
- **Power to liquid.** Met Power to liquid worden vloeibare brandstoffen gemaakt waarbij elektriciteit als energiebron wordt gebruikt. CO₂ en H₂O (de moleculen die vrijkomen bij verbranding) worden met behulp van elektriciteit tot lange koolwaterstofketens gesynthetiseerd. De technologie is nog niet economisch rendabel en in 2030 kan hiermee maximaal 2% CO₂-reductie bereikt worden. Het opschalingspotentieel is aanzienlijk. In 2050 kan 63% gereduceerd worden ten opzichte van de baseline CO₂-emissie.
- **Optimaal Air Traffic Management.** Met het optimaliseren van de vliegroutes in Europa kan 3% in 2030 en 2% in 2050 gereduceerd worden ten opzichte van de baseline CO₂-emissie.
- **Versneld schonere vliegtuigen inzetten.** Als de gemiddelde leeftijd van de vliegtuigvloot wordt teruggebracht van 11 naar 7 jaar dan leidt dit tot een CO₂-reductie van 3% in 2030 en 2050 ten opzichte van de baseline.

- **Biobrandstoffen.** Op zeer kleine schaal wordt al enkele jaren gevlogen op een blend van biobrandstof en fossiele kerosine. Rekening houdend met de vraag naar biobrandstoffen in andere transportsectoren (weg- en scheepvaart), de biomassa-vraag van de chemie en energiesector en de beschikbaarheid van biomassa dan kan 7% in 2030 en 26% in 2050 gereduceerd worden ten opzichte van de baseline CO₂-emissie.

3.2 Effect maatregelen op overige klimaatimpact van vliegverkeer

Naast de bijdrage via CO₂-emissies draagt vliegverkeer bij aan de opwarming van de aarde door onder andere de vorming van cirrusbewolking en ozon (zie kader 2). De mate waarmee deze aanvullende klimaatimpact wordt vermeden verschilt per maatregel:

- Met de inzet van biobrandstoffen of Power to liquid in plaats van kerosine wordt niets of weinig gedaan aan de overige klimaatimpact van vliegverkeer. Mogelijk is de impact van biobrandstoffen en Power to liquid iets kleiner vanwege de schonere verbranding.
- De relatief grootste klimaatimpact-reductie kan worden bereikt met volledig elektrisch vliegen, waarmee zowel de CO₂-emissie als de aanvullende klimaatimpact volledig kan worden vermeden.
- Met Airside electric operations wordt alleen het klimaateffect van de CO₂-emissie van kerosineverbranding vermeden, omdat het kerosine bespaart die op zeeniveau wordt verbrand.
- Voor de overige technische- en procesmaatregelen geldt dat de CO₂-reductie die wordt bereikt door vermindering van kerosineverbranding op kruishoogte, óók tot een reductie op de aanvullende klimaatimpact leidt.

3.3 Conclusies

Tussen 1990 en 2016 is de CO₂-emissie van de Nederlandse luchtvaart ruim verdubbeld (van 4,6 tot 11,3 MtCO₂). In het baseline scenario stijgt de CO₂-emissie door tot circa 13 MtCO₂ in 2030 en tot circa 20 MtCO₂ in 2050. Een verviervoudiging dus in 2050 ten opzichte van 1990. In deze deskstudie is een overzicht gemaakt van het CO₂-reductiepotentieel van tien technische- en procesmaatregelen. Het doel hiervan is om beleidsmakers en andere stakeholders een overzicht te geven van de effectiviteit en haalbaarheid van deze verschillende maatregelen. Het is nadrukkelijk niet de bedoeling om het CO₂-reductiepotentieel van maatregelen bij elkaar op te tellen vanwege dubbeltelling (zie kader 1). Op basis van de resultaten in

Figuur 2 en de factsheets in de bijlage zijn de volgende conclusies getrokken:

- Het CO₂-emissiereductiepotentieel in de luchtvaartsector is tot 2030 beperkt, met als belangrijkste oorzaak de vereiste omschakeltijd (vlootvernieuwing, infrastructuur, opschaling van duurzame energiedragers) benodigd voor een brede uitrol van de CO₂-reductiemaatregelen. De jaarlijkse efficiëntieverbetering kan de stijgende CO₂-emissie als gevolg van de groei van de sector niet 'compenseren', laat staan terugdringen.
- De maatregelen waarmee op korte termijn (de komende 10 jaar) CO₂-reductie kan worden bereikt, hebben een klein besparingspotentieel van enkele procenten in 2030. Voorbeelden hiervan zijn elektrisch taxiën, optimaal air traffic management en aanvullende efficiëntieverbeteringen (het grootste deel van het effect van efficiëntieverbeteringen zit al verwerkt in de baseline CO₂-emissies).

- Biobrandstoffen steekt daar als enige maatregel bovenuit en kan in 2030 tot een CO₂-reductie ten opzichte van de baseline leiden van 7%, mits voldaan wordt aan de duurzaamheidseisen voor biomassa.
- Tussen 2030 en 2050 begint het CO₂-reductiepotentieel betekenisvoller te worden. Met name biobrandstoffen (26%), Power to Liquid (63%) en hybride elektrisch vliegen (8%) kunnen een significante bijdragen leveren. Hier moeten echter enkele belangrijke kanttekeningen bij worden geplaatst:
 - De grootschalige uitrol van zowel biobrandstoffen als Power to Liquid is afhankelijk van zeer veel factoren en de benutting van hun potentieel is onzeker. De kosten per ton CO₂-reductie zullen in ieder geval fors zijn en leiden tot hogere ticketprijzen (kwantificering hiervan valt buiten de scope van dit onderzoek). Ook dient voor Power to Liquid veel additionele duurzame elektriciteit geproduceerd te worden.
- Elektrisch vliegen levert op de 2050 tijdshorizon een beperkte bijdrage aan CO₂-reductie (en alleen onder de voorwaarde dat de elektriciteit duurzaam is opgewekt). Echter, de overige radiative forcing effecten worden met elektrisch vliegen óók vermeden, in tegenstelling tot bij biobrandstoffen en Power to Liquid. Met het oog op *klimaatneutraal* vliegen kan elektrisch vliegen op termijn daarom een belangrijke technologie worden voor de luchtvaartsector.
- Maatregelen waarvoor geheel nieuwe vliegtuigen nodig zijn (elektrisch vliegen, propellervliegtuigen en bepaalde efficiency maatregelen), hebben 'last' van de lange levensduur van vliegtuigen. In theorie kunnen ze heel effectief zijn, maar het vervangen van de vloot kost al snel 25 jaar.

De CO₂-reductie in de luchtvaart hangt voor een groot deel af van de snelheid waarmee de CO₂-prijs omhooggaat. Als de prikkel om CO₂ te reduceren in de luchtvaartsector sterker wordt, dan komen maatregelen zoals hybride-elektrisch vliegen en Power to Liquid eerder binnen bereik dan wanneer de CO₂-prijs laag blijft. Bij een lage CO₂-prijs is het voor de sector voordeliger om de CO₂-reductiedoelstellingen te halen middels compensatie. Of het technische reductiepotentieel van de in deze studie gepresenteerde CO₂-reductiemaatregelen benut wordt, valt of staat dus met de kosten van de maatregelen en de hoogte van de CO₂-prijs. Vervolgonderzoek in de vorm van een techno-economische scenarioanalyse is nodig om te berekenen tegen welke prijs de CO₂-reductie per maatregel te realiseren is en wat de kosten zijn van verschillende CO₂-reductiepaden.

Bijlage - Uitwerking maatregelen in factsheets

In deze bijlage worden de maatregelen nader toegelicht en wordt de CO₂-besparing in de tijd ten opzichte van de baseline in een grafiek weergegeven. Daarnaast worden in tabelvorm de volgende punten besproken en gepresenteerd:

- **Jaar van eerste besparing:** wanneer met de maatregel voor het eerst een significante CO₂-reductie bereikt kan worden
- **Besparing in 2050:** hoeveel CO₂ met de maatregel maximaal bespaard kan worden in 2050 ten opzichte van de baseline
- **Niet-CO₂ bijdrage klimaatverandering:** wat het effect is op de aanvullende klimaatimpact van vliegverkeer (kwalitatief).
- **Facts & Figures:** enkele aanvullende gegevens ter toelichting op de maatregelen

De maatregelen worden behandeld in willekeurige volgorde, zoals gepresenteerd in paragraaf 2.2.

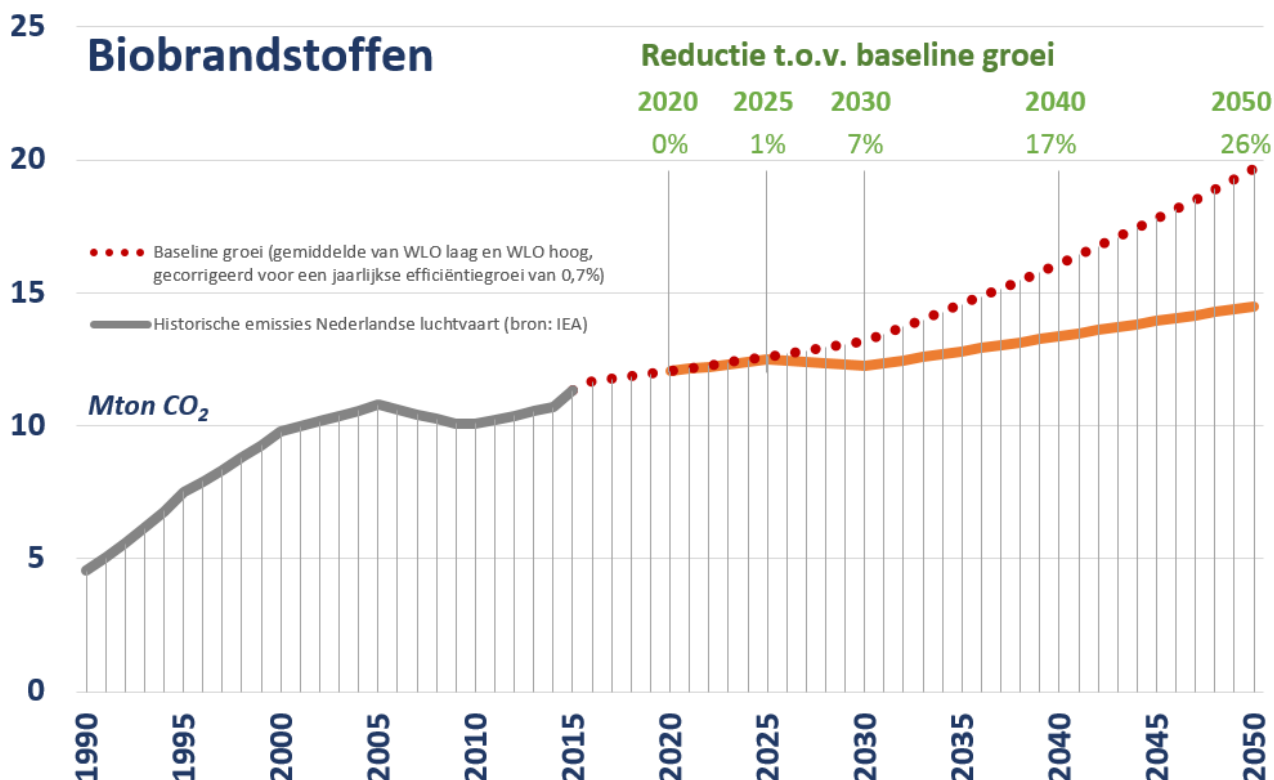
1) Biobrandstoffen

Toelichting maatregel

Biobrandstof wordt verkregen uit de raffinage van biomassa. Omdat de koolstofatomen relatief kortgeleden door planten via CO₂ uit de atmosfeer zijn gehaald (in tegenstelling tot koolstofatomen in fossiele energiedragers) wordt de CO₂ die vrijkomt bij verbranding van biobrandstoffen als klimaatneutraal beschouwd. In de keten vinden nog wel CO₂-emissies plaats. Volgens de nieuwe Renewable Energy Directive (RED II) moet de besparing van transportbiobrandstof ten opzichte van fossiele brandstof minimaal 65% zijn voor productiefaciliteiten die vanaf 2021 operationeel worden⁸.

Momenteel wordt vooral gebruikt frituurvet (used cooking oil, kortweg UCO) als feedstock voor luchtvaartbiobrandstof ingezet. In principe kunnen alle organische (en fossiele) reststromen gebruikt worden om luchtvaartbrandstoffen van te maken. Voorbeelden zijn: landbouw- en bosbouwresiduen, dierlijke mest, rioolwater, huishoudelijke afval en procesgassen uit de staalindustrie. Voedselgewassen kunnen ook gebruikt worden maar hebben minder de aandacht vanwege duurzaamheidsissues omtrent landgebruik. Vanuit dat oogpunt kan algenteelt (op de lange termijn) een duurzame feedstock voor luchtvaartbrandstoffen worden. De kans dat gewassen voor luchtvaartbrandstof in Nederland geteeld worden is overigens zeer klein. De klimatologische omstandigheden zijn suboptimaal en de landbouwgrondprijs is relatief hoog. Bovendien worden biobrandstoffen van voedselgewassen in de RED II vanaf 2021 afgebouwd. De komende jaren ligt de focus op het gebruik van reststromen als feedstock voor Sustainable Aviation Fuel (SAF).

⁸ https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/EU_Fuels_Policy_Update_20180719.pdf



Biobrandstoffen	
Eerste besparing → 2008	Verschillende luchtvaartmaatschappijen vliegen al enkele jaren op een blend van biobrandstof en fossiele kerosine, waaronder KLM. SkyNRG leverde in 2017 ruim 10.000 ton Sustainable Aviation Fuel (SAF) op basis van UCO in de EU, VS en Canada ⁹ .
Bespaard in 2030 → 7% Bespaard in 2050 → 26%	Op basis van een analyse met het RESolve-Biomass model (ontwikkeld door ECN) groeit het gebruik van UCO+Advanced aviation biofuel van 2,1 PJ/jaar in 2025 tot 17,6 PJ/jaar in 2030¹⁰. In 2025 zijn de luchtvaartbiobrandstoffen daarbij goed voor 7% van het totale biobrandstofgebruik en in 2030 voor 35% (de rest gaat naar wegtransport en scheepvaart). Bij een gemiddelde CO₂-besparing van 75% (de minimumeis voor RED II is 65% en lignocellulose via Fischer Tropsch kan 93% besparen¹⁰) ten opzichte van fossiele kerosine resulteert dit in een CO₂-besparing t.o.v. de baseline emissies van 7% in 2030. Het biobrandstoffen potentieel in de luchtvaart in 2050 is gebaseerd op het gemiddelde van een studie van ICCT¹¹ en Ecorys (uitgevoerd in opdracht van de Europese Commissie, DG R&I¹²), wat neerkomt op 96 PJ. Bij een gemiddelde CO₂-besparing van 75% leidt dit tot 26% CO₂-reductie ten opzichte van de baseline. Het ICCT-rapport gaat uit van een duurzaam biobrandstoffen potentieel in 2050 van 4

⁹ Persoonlijke communicatie SkyNRG, augustus 2018.

¹⁰ Sierk de Jong 2018, Green Horizons. On the production costs, climate impact and future supply of renewable jet fuels.

¹¹ El Takriti et al., ICCT 2017. Mitigating international aviation emissions.

¹² Research and Innovation perspective of the mid- and long-term Potential for Advanced Biofuels in Europe, Figuur 49.

	EJ wereldwijd, wat overeenkomt met 85.5 PJ voor Nederland (op basis van het 2015 aandeel van Nederland in de aviation bunker fuel consumptie van 2.1%). De Ecorys studie berekent een biobrandstoffen potentieel in 2050 van 44% (gemiddeld scenario) tot 52% (hoog scenario), bij een totale brandstofvraag van 2.479 PJ. Onder de aanname dat het Nederlandse aandeel in de totale EU-luchtvaartbrandstofvraag gelijk blijft, zou dit neerkomen op maximaal 107 PJ. Het is belangrijk om te benadrukken dat de snelheid waarmee luchtvaartbiobrandstoffen beschikbaar komen afhankelijk is van zeer veel factoren en dat de onzekerheid over het groeipad groot is.
Niet-CO₂ bijdrage klimaatverandering	Net als bij Power to liquid wordt alleen op CO₂-emissies bespaard (omdat deze CO₂ van biobrandstof kort-cyclisch van aard is). De overige radiative forcing effecten als gevolg van brandstofverbranding hoog in de atmosfeer zijn nog onvoldoende bekend. SAF leidt mogelijk tot een significantie reductie van niet-CO₂ emissies, tot zelfs 80% voor PM_{2.5} en 90% voor SO_x¹³. Naar het effect op klimaatverandering wordt nog volop onderzoek gedaan. Volgens een recente studie van de National Research Council Canada is met testvluchten vastgesteld dat een biobrandstof blend (43% HEFA) tot 10% kleinere contrails kan leiden in vergelijking tot conventionele luchtvaarbrandstof¹⁴. Wat het reductiepotentieel voor de radiative forcing is moet verder onderzoek uitwijzen.
Facts & figures	- Schattingen voor de CO₂-abatements cost voor luchtvaartbiobrandstof lopen uiteen. Een recente studie van Ricardo¹⁵ voor het UK department for Transport komt op een CO₂-abatements cost van €150/ton CO₂. Malins (2018)¹⁶ houdt een range aan van €200-€400/ton CO₂. - Vanwege de afwezigheid van competitie voor landbouwgrond zouden algen een goede optie kunnen zijn voor de productie van hernieuwbare brandstoffen. Het is echter de vraag of grootschalige biobrandstofproductie uit algen duurzaam is. Algen hebben nutriënten nodig om voldoende hard te kunnen groeien. Hier kunnen organische reststromen voor worden gebruikt maar bij verdere opschaling zal kunstmest nodig zijn, waarmee de energie-efficiëntie van het proces en de CO₂-besparing van de biobrandstof t.o.v. fossiel onder druk komt te staan.

¹³ Booz Allen Hamilton et al., 2018. State of the Industry Report on Air Quality Emissions from Sustainable Alternative Jet Fuels

¹⁴ NRC Flight Research Laboratory, 2018. Civil Aviation Alternate Fuels Contrails and Emissions Research – Contrails Analysis

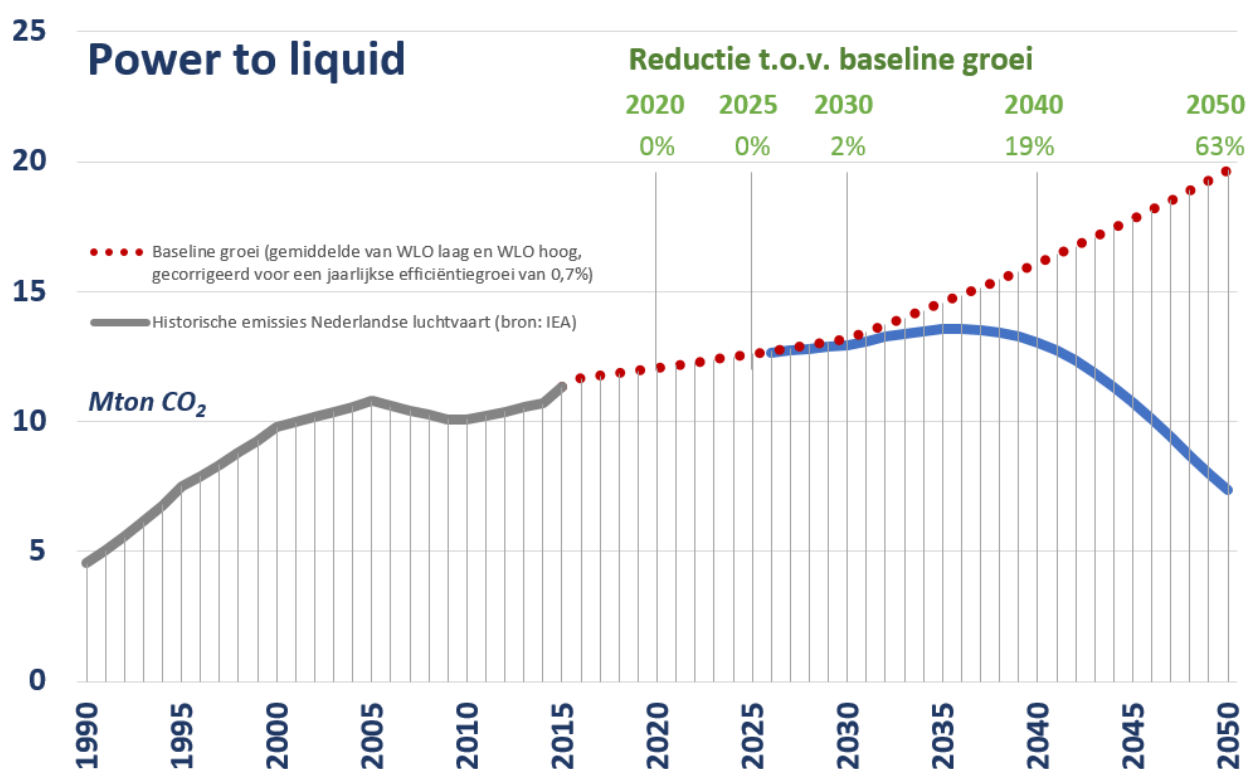
¹⁵ https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/653776/carbon-abatement-in-uk-aviation.pdf

¹⁶ <https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/Alternative%20aviation%20fuels%2C%20Flightpath%20to%202050Dr.%20Chris%20Malins.pdf>

2) Power to liquid

Toelichting maatregel

Power to liquid (PtL), ook wel electrofuel genoemd, staat voor de productie van vloeibare brandstoffen waarbij elektriciteit als energiebron wordt gebruikt. CO₂ en H₂O (de moleculen die vrijkomen bij verbranding) worden met behulp van elektriciteit tot lange koolwaterstofketens gesynthetiseerd. Fischer Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene (FT-SPK) was in 2009 de eerste 'drop-in' vliegtuigbrandstof, die volgens de ASTM D7566 standaard tot 50% bijgemengd mag worden met conventionele kerosine. Inmiddels zijn vijf alternatieve brandstoffen goedgekeurd en worden zestien nieuwe routes gereviewd door ASTM¹⁷. Voor de reeds goedgekeurde alternatieven worden de koolstofatomen voor de koolwaterstofketens nog uit steenkool of biomassa gehaald maar op termijn zou hiervoor ook CO₂ uit de atmosfeer gebruikt kunnen worden¹⁸. Power to liquid is een potentieel duurzaam alternatief voor fossiele kerosine. Voor het productieproces is echter veel elektriciteit nodig; ongeveer twee keer zoveel als de energie-inhoud van de geproduceerde brandstof¹⁹. Om met Power to liquid CO₂-emissies in de luchtvaart te reduceren geldt als voorwaarde dat de gebruikte elektriciteit van hernieuwbare oorsprong is en dat de benodigde CO₂ een afvalproduct is of uit de atmosfeer wordt gehaald (direct air capture).



¹⁷ <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/AltFuels-Q4-1.aspx>

¹⁸ German environmental agency (2016). Power-to-liquids, Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel.

¹⁹ Malins (2017). What role is there for electrofuel technologies in European transport's low carbon future?

Power to Liquid	
Eerste besparing → 2025	De technologie is bewezen maar vanwege de hoge kosten en benodigde schaalgrootte is de verwachting dat Power to liquid vóór 2030 maar een beperkte bijdrage kan leveren aan het reduceren van CO ₂ -emissies in de luchtvaart ¹⁹ . Momenteel lopen er enkele Power to liquid pilot- en demonstratieprojecten. Sunfire werkt aan 8.000 liter/jaar fabriek in Noorwegen die in 2020 operationeel moet zijn. Deze blue crude ('blue' vanwege het gebruik van waterkracht in het productieproces) zal als bouwsteen voor hoogwaardige plastics en oliën worden gebruikt. De jaarproductie is nauwelijks genoeg om een groot passagiersvliegtuig één uur op te laten vliegen. Lufthansa heeft aangekondigd in 2025 vijf procent van de luchtvaartbrandstof die op de thuishaven Hamburg wordt gebruikt met Power to liquid te willen invullen ²⁰ . Dit staat gelijk aan 0,75 PJ en moet geproduceerd worden in de raffinaderij van het nabijgelegen Heide.
Bespaard in 2030 → 2%	Theoretisch gezien zou 100% CO₂-besparing met Power to liquid mogelijk zijn als CO₂ uit de atmosfeer wordt gebruikt in combinatie met 100% hernieuwbare elektriciteit voor het productieproces. Echter, vanwege de hoge kosten, de grote duurzame elektriciteitsvraag en de benodigde ramp-up van productiefaciliteiten is dat voor 2050 niet realistisch. Voor de opschaling van Power to liquid voor luchtvaartbrandstoffen is gekeken naar de ontwikkeling van windenergie in Europa tussen 1991 en 2016, een periode waarin deze technologie met wet- en regelgeving werd gestimuleerd van niet rendabel tot (bijna) concurrerend met fossiele elektriciteit. In deze periode van 26 jaar groeide de windenergie opwekking aanvankelijk met 40% per jaar en liep geleidelijk terug tot 8%²¹. Als in 2025 de eerste 0,75 PJ CO₂-vrije Power to liquid brandstof in de Nederlandse luchtvaartsector wordt ingezet (een volume gelijk aan de ambitie van Lufthansa in Duitsland) en vervolgens het groeipad wordt gevolgd dat windenergie heeft doorgemaakt dan zou dit tot een CO₂-besparing leiden (ten opzichte van de baseline) van 2% in 2030 (3,7 PJ) en van 63% in 2050 (172 PJ). De 2030 waarde (3,7 PJ) komt ook naar voren in een studie van Quintel en Kalavasta naar Power to liquid productie in Nederland²² en is vergelijkbaar met het productievolume van de biodieselfabriek in Amsterdam (met 4,5 PJ per jaar de grootste van Europa). De snelheid waarmee Power to liquid brandstof doorbreekt is afhankelijk van onder andere de snelheid waarmee de productiekosten omlaag gaan. Beleidsmaatregelen (die tot een hoge CO₂-prijs leiden) zijn daarbij onontbeerlijk. Ook het realiseren van additionele duurzame elektriciteit is een voorwaarde om met Power to liquid daadwerkelijk CO₂ te reduceren in de luchtvaartsector.
Bespaard in 2050 → 63%	
Niet-CO₂ bijdrage klimaatverandering	Alleen het CO ₂ -deel van de klimaatimpact wordt met Power to liquid weggenomen. Op overige radiative forcing effecten wordt vanwege de continuering van brandstofverbranding op grote hoogte niet of nauwelijks bespaard ¹⁹ .
Facts & figures	Power to liquid kerosine kost in 2030 €79-95 per GJ en in 2050 €67-78²³. De huidige prijs van fossiele kerosine ligt een factor 5 à 6 lager (ongeveer

²⁰ <https://www.transportenvironment.org/news/lufthansa-takes-first-steps-towards-non-fossil-kerosene?>

²¹ <https://ec.europa.eu/eurostat/>. Trend 1991 – 2016 van windenergie (Complete energy balances - annual data [nrg_110a])

²² Quintel en Kalavasta (2018), Carbon Neutral Aviation with Current Engine Technology

²³ Schmidt et al. (2016). Renewables in transport 2050.

€14,5/GJ). In de studie van Quintel en Kalavasta voor Power to liquid productie in Nederland, wordt voor een baseline scenario waarin gebruik wordt gemaakt van CO₂ en CO van Tata Steel in IJmuiden een kostprijs van €30 per GJ gevonden en voor een scenario met CO₂ uit de atmosfeer een kostprijs van €41 per GJ.

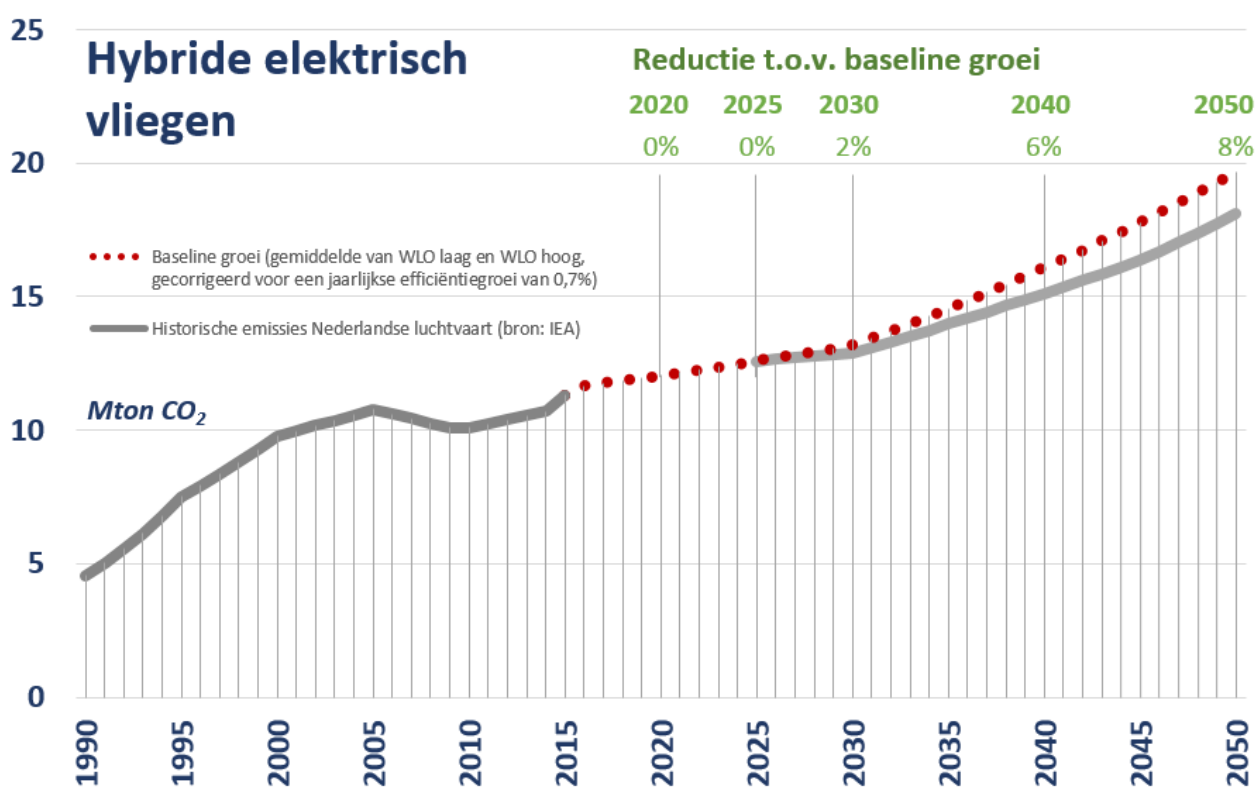
- De ticketprijs wordt daardoor ongeveer 1,4 - 2,3 keer zo hoog (het huidige aandeel van de brandstofkosten is 1/3 van de ticketprijs)
- Bij een CO₂-emissie van 71,5 kgCO₂/GJ, een gelijkblijvende kerosineprijs en €67/GJ voor Power to liquid is de CO₂-abatementskosten €734/ton. In de analyse van Quintel en Kalavasta ligt de CO₂-abatementskosten beduidend lager: €112/tCO₂ voor Power to liquid met CO₂ en CO van Tata Steel in IJmuiden €188/tCO₂ voor Power to liquid met CO₂ uit de atmosfeer.
- Om 100% van de huidige Nederlandse kerosine consumptie (165 PJ)²⁴ met Power to liquid te produceren is het dubbele aan duurzame elektriciteit nodig (330 PJ). Dat is nog meer dan de in het klimaatakkoord geformuleerde duurzame elektriciteitsdoelstelling voor 2030 (302 PJ). De productie hoeft overigens niet in Nederland plaats te vinden. Het ligt voor de hand om Power to liquid faciliteiten te realiseren nabij goedkope duurzame elektriciteit opwekcapaciteit en de vloeibare brandstof naar Nederland te transporteren.

²⁴ <https://longreads.cbs.nl/trends17/economie/cijfers/energie/>

3) Hybride elektrisch vliegen

Toelichting maatregel

Het concept hybride elektrische vliegen is vergelijkbaar met hybride elektrisch rijden. Het vliegtuig wordt deels met elektrische energie en deels met verbrandingsenergie aangedreven. Er zijn verschillende configuraties mogelijk waarbij de stuwkracht worden geleverd via een combinatie van gasturbines en elektrische aandrijving, of alleen elektrische aandrijving. Het voordeel ten opzichte van volledig elektrisch vliegen is dat de hybride vliegtuigen met kleinere batterijpakketten kunnen worden uitgerust, waardoor een interessante range voor passagiersvliegtuigen (>1000 km) eerder bereikt kan worden.



Hybride elektrisch vliegen	
Eerste besparing → 2025	Airbus, Rolls-Royce en Siemens ontwikkelen samen de E-Fan X hybride. Een demonstratietoestel waarmee in 2020 de eerste testvluchten worden uitgevoerd ²⁵ . Het doel is om aan te tonen dat hybride vliegen mogelijk is voor afstanden tot 1000 km voor ruim 100 passagiers ²⁶ . ZUNUM Aero ontwikkelt een kleiner hybride vliegtuig voor 12 passagiers waarmee in 2019 getest wordt ²⁷ . In het meest gunstige scenario kunnen de eerste hybride vliegtuigen vanaf 2025 commercieel worden ingezet op korte-afstandsvluchten met een beperkt aantal passagiers (<25). Vanaf 2030 is grootschalige toepassing op korte vluchten (2000 km) mogelijk haalbaar ²⁸ . Hoe langer de vlucht hoe hoger de energiedichtheid van de batterij dient te zijn om brandstofbesparing met hybride vliegen te realiseren.
Bespaard in 2030 → 2%	Op vluchten tot maximaal 5.000 km kan met hybride vliegtuigen mogelijk tot 30% op brandstof worden bespaard ²⁹ . Alle intra-EU vluchten zijn samen goed voor ongeveer 25% van de CO ₂ -uitstoot ³⁰ . Aannemende dat voor Nederland het aandeel intra-EU vluchten eveneens 25% van de totale CO ₂ -uitstoot is en dat op die vluchten 30% kan worden bespaard, dan levert dat maximaal 8% CO ₂ -reductie op. Uitgaande van een start in 2025 en een periode van 25 jaar voor volledige infasering (rekening houdend met certificering en afschrijving van de huidige vloot) dan wordt de 8% CO ₂ -reductie ten opzichte van de baseline in 2045 bereikt.
Bespaard in 2050 → 8%	
Niet-CO₂ bijdrage Klimaatverandering	In tegenstelling tot bij Power to liquid en Biobrandstoffen worden door elektrische aandrijving en de kerosine die daarmee wordt bespaard, óók de overige radiative forcing effecten vermeden. Het gaat dan met name om het deel kerosinebesparing op kruishoogte.
Facts & figures	- Een mogelijk grotere drijfveer om over te stappen op hybride vliegtuigen is de geluidreductie die ermee bereikt kan worden zodat geluidsrestricties een verdere groei minder in de weg staan³¹. Een mogelijk reboundeffect om rekening mee te houden. - In verhouding tot oudere modellen in de huidige vloot liggen de operationele kosten voor hybride vliegtuigen waarschijnlijk substantieel lager³², waardoor marktpenetratie wellicht snel kan verlopen.

²⁵ <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2017/11/airbus--rolls-royce--and-siemens-team-up-for-electric-future-par.html>

²⁶ <https://www.deingenieur.nl/artikel/hybride-elektrisch-vliegtuig-van-europese-bedrijven>

²⁷ <https://zunum.aero/>

²⁸ <https://www.independent.co.uk/travel/news-and-advice/electric-planes-aircraft-rolls-royce-airbus-siemens-easyjet-2027-hybrid-a8079841.html>

²⁹ Assessment of Potential Fuel Saving Benefits of HybridElectric Regional Aircraft (Thesis Joris van Bogaert, TU Delft)

³⁰ <http://www.pbl.nl/publicaties/ontwikkeling-luchtvaart-en-co2-emissies-in-nederland>

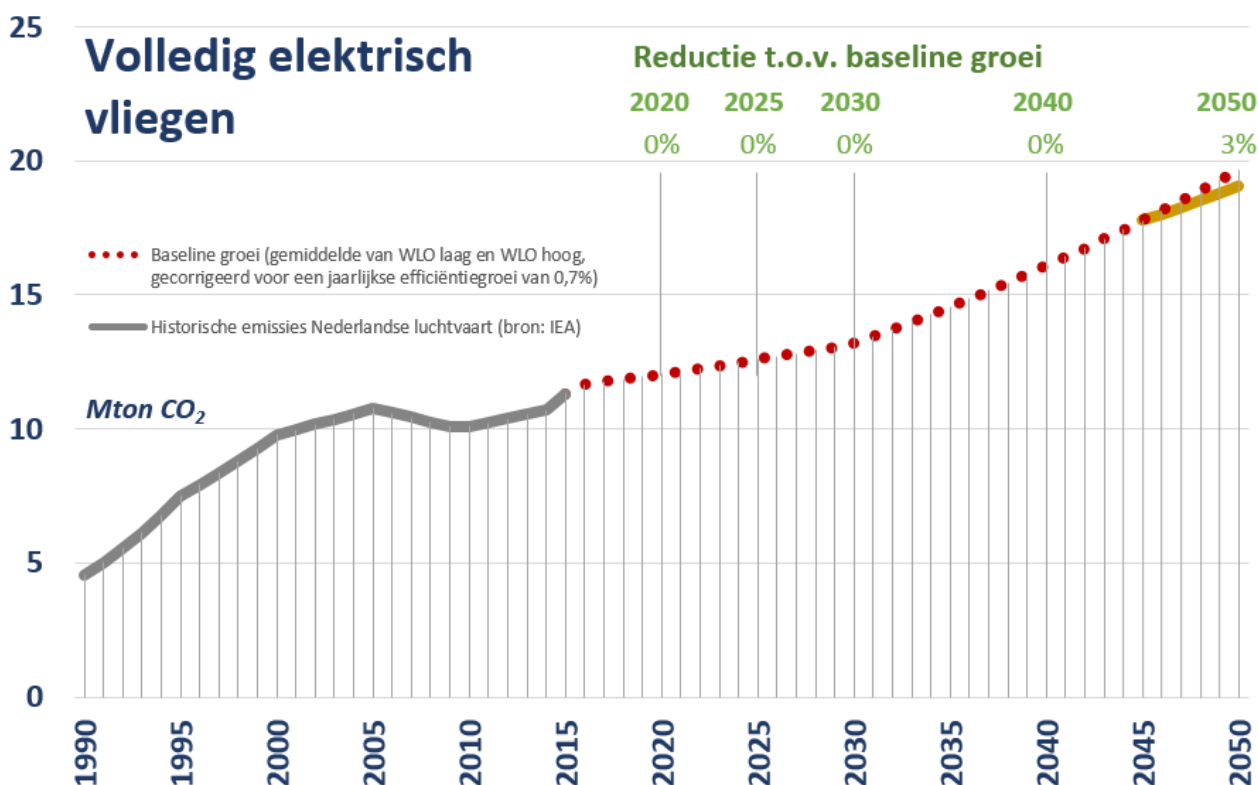
³¹ <https://spectrum.ieee.org/aerospace/aviation/hybrid-electric-airliners-will-cut-emissionsand-noise>

³² <http://www.greenaironline.com/news.php?viewStory=2365>

4) Volledig elektrisch vliegen

Toelichting maatregel

Bij volledig elektrisch vliegen zijn de verbrandingsmotoren geheel vervangen door elektromotoren en wordt geen CO₂ meer uitgestoten tijdens de vlucht. De energie kan worden opgeslagen in batterijen of in waterstof, die in combinatie met een brandstofcel in elektriciteit wordt omgezet. De grote uitdaging voor volledig elektrisch vliegen is het verhogen van de energiedichtheid van batterijen (power-to-weight ratio) of, in het geval van waterstof, het meevoeren van grote volumes gekoelde waterstof (dat in vloeibare vorm bij een temperatuur van -253°C nog altijd een ruim 4 keer zo lage energiedichtheid per volume-eenheid heeft als kerosine), zodat het aantal passagiers en de range die met volledig elektrische vliegtuigen gehaald kan worden voor civiele luchtvaart interessant wordt. Een batterijenergiedichtheid van 1 kWh/kg wordt gezien als ondergrens om elektrisch vliegen mogelijk te maken met een conventioneel vliegtuigontwerp, ongeveer vier à vijf keer de huidige energiedichtheid. Bij voortzetting van de historische verbetering van 8% per jaar duurt het circa 10 jaar voordat de batterijenergiedichtheid verdubbelt³³. Een alternatieve route naar volledig elektrisch vliegen is het maken van een sterk aangepast vliegtuigontwerp waarmee een batterijenergiedichtheid van 0,4 kWh/kg volstaat voor burgerluchtvaart³⁴. Gezien de technologische vooruitgang die nog geboekt moet worden en het lange traject van ontwerp en certificering van nieuwe modellen ligt de grootschalige introductie van volledig elektrisch vliegen minimaal zo'n 25 jaar in de toekomst.



³³ <http://sustainableskies.org/solid-energy-2x-battery-going-commercial/>

³⁴ <https://www.wired.com/2017/05/electric-airplanes-2/>

Volledig elektrisch vliegen	
Eerste besparing → 2030	Kleine volledige elektrische vliegtuigen zijn sinds kort op de markt, zoals de tweezitter Alpha Electro van Pipistrel. De stap naar een volledig elektrisch passagiersvliegtuig is echter nog groot. Anticiperend op een verdere verbetering van de energiedichtheid van batterijen zijn verschillende partijen bezig met de ontwikkeling van volledig elektrische modellen voor >10 passagiers ³⁵ , al dan niet met hybride als tussenstap. Testvluchten staan gepland vanaf 2020 en voor het verkrijgen van de certificering en het bouwen van een productielijn kan gerekend worden op een jaar of 10. De eerste CO ₂ -besparing met volledige elektrische (kleine) passagiersvliegtuigen wordt daarom vanaf 2030 verwacht.
Bespaard in 2030 → 0%	Op basis van een timeline voor de introductie van elektrisch vliegen van de NASA³⁶ wordt technology readiness level 6 voor een volledig elektrische 50-seater met een range van 750 km niet eerder dan in 2035 bereikt. Onder de aanname dat het nog 10 jaar duurt voordat deze vliegtuigen op de markt komen en nog eens 20 jaar voordat de vloot volledig is vervangen, zal de maximale potentie van volledig elektrische 50-seaters in 2065 bereikt kunnen worden. Alle intra-EU vluchten zijn samen goed voor ongeveer 25% van de CO₂-uitstoot³⁰. Op basis van de aanname dat de helft hiervan wordt uitgestoten op vluchten van <750 km afstand dan is het reductiepotentieel 12,5%. Bij een lineaire groei na introductie in 2045 komt de besparing in 2050 op 3,1%. Voor de periode tot 2050 wordt niet verwacht dat volledig elektrisch vliegen beschikbaar komt voor middellange en lange afstandsvluchten i.v.m. de benodigde energiedichtheid van de batterijen.
Bespaard in 2050 → 3%	
Niet-CO₂ bijdrage klimaatverandering	In tegenstelling tot bij Power to liquid en Biobrandstoffen wordt door elektrische aandrijving en de kerosine die daarmee wordt bespaard óók, de overige radiative forcing effecten vermeden. Het gaat dan met name om het deel kerosinebesparing op kruishoogte.
Facts & figures	- Noorwegen streeft naar het uitvoeren van alle nationale vliegbewegingen tot 1,5 uur met volledig elektrische vliegtuigen in 2040. Het voornemen is om vanaf 2025 een tender uit te schrijven voor een volledig elektrische 19-seater. - Energiedichtheid van batterijen is een cruciale factor voor volledig elektrisch vliegen. Een energiedichtheid van 1.000 Wh/kg wordt gezien als voorwaarde voor voldoende bereik en capaciteit voor commerciële civiele luchtvaart^{29,37}. Dat is ruim viermaal de energiedichtheid van de huidige generatie Tesla batterijen. De grote vraag is of en wanneer deze energiedichtheid gehaald kan worden. In de huidige li-ion batterijtechnologie zit niet veel rek meer maar met bijvoorbeeld de Natrium-ion technologie zijn in het lab dichtheden van 650 Wh/kg gehaald³⁸.

³⁵ <https://techcrunch.com/2018/07/08/the-electric-aircraft-is-taking-off/?guccounter=1>

³⁶ <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20160005232.pdf>

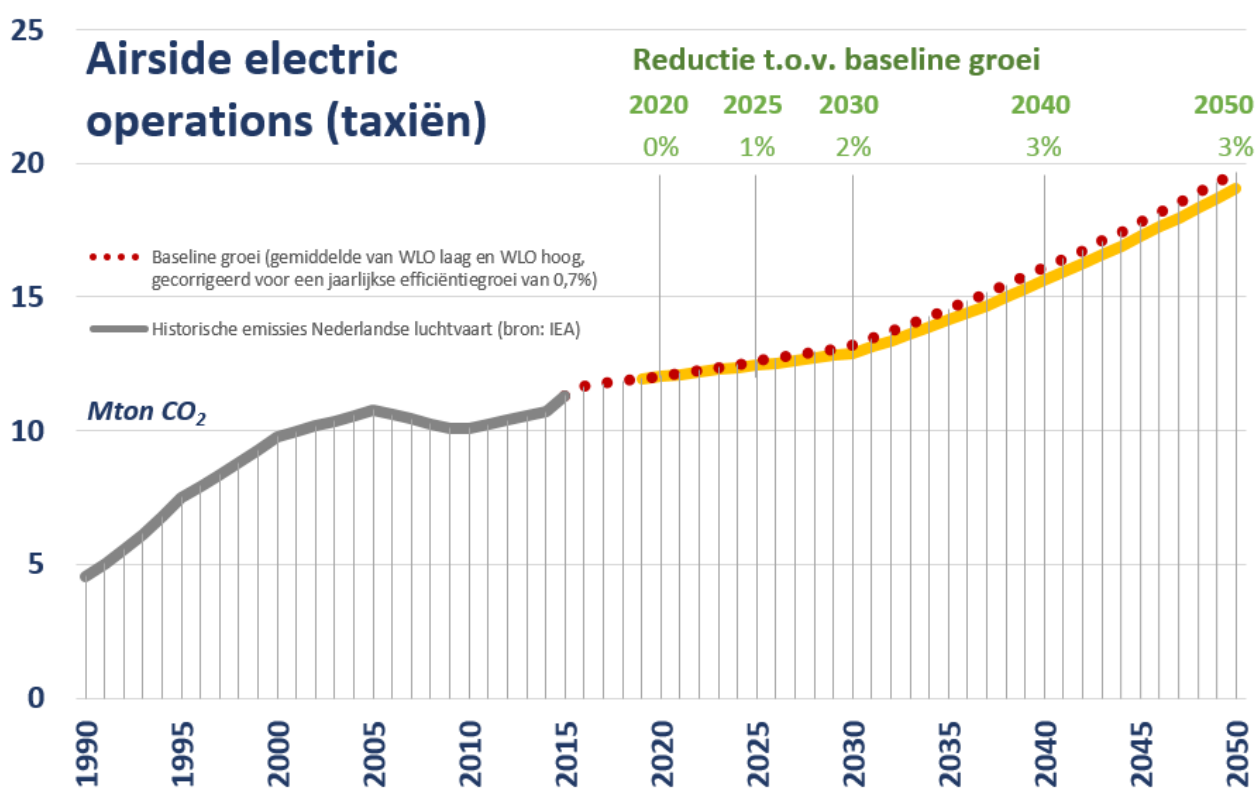
³⁷ <https://www.wired.com/2017/05/electric-airplanes-2/>

³⁸ <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adfm.201403241>

5) Airside electric operations (taxiën)

Toelichting maatregel

Het airside-gebied van een luchthaven betreft het gedeelte dat niet toegankelijk is voor het publiek, voornamelijk de start- en landingsbanen en bedrijfsgebouwen. Naast emissies van vliegtuigen vindt hier ook CO₂-uitstoot plaats door onder andere passagiersvervoer met bussen, bagageafhandeling, toelevering van goederen en brandstof en onderhoud aan vliegtuigen. Veel van deze emissies zijn te vermijden door elektrificatie. In deze studie is alléén gekeken naar de emissies als gevolg van het taxiën van de vliegtuigen. Ongeveer 3% van de totale vliegtuigemissies vindt plaats tijdens het taxiën³⁹.



³⁹ <https://www.lufthansa-technik.com/etaxi>

Airside electric operations (taxiën)	
Eerste besparing → direct	Op de luchthaven van Frankfurt maakt Lufthansa sinds 2014 gebruik van de TaxiBot voor commerciële doeleinden ⁴⁰ . Het is een hybride taxi waarmee slechts 2% brandstof wordt gebruikt ten opzichte van volledig op kerosine taxiën.
Bespaard in 2030 → 2%	De TaxiBot kan tot 70% van de huidige vloot bedienen ⁴¹ . Aangenomen is dat via lineaire groei deze 70% in 2030 bereikt wordt en dat dit aandeel doorgroeit tot 100% in 2035 met nieuw te ontwikkelen elektrische taxi's. Uiteindelijk leidt dat tot ongeveer 3% besparing op CO ₂ -emissies.
Bespaard in 2050 → 3%	
Niet-CO₂ bijdrage klimaatverandering	Deze maatregel heeft alleen effect op CO ₂ -emissies die plaatsvinden op de luchthavens. Er zijn daarom geen aanvullende radiative forcing effecten.
Facts & figures	Ook brandstofceltechnologie kan gebruikt worden om CO₂-neutraal te taxiën. EasyJet doet daar onderzoek naar. Voor EasyJet, dat relatief korte vluchten uitvoert, is het kerosineverbruik tijdens taxiën 4% van het totaal⁴².

⁴⁰ <https://www.ainonline.com/aviation-news/air-transport/2016-10-10/taxibot-ready-cut-cost-and-carbon-footprint-taxiing>

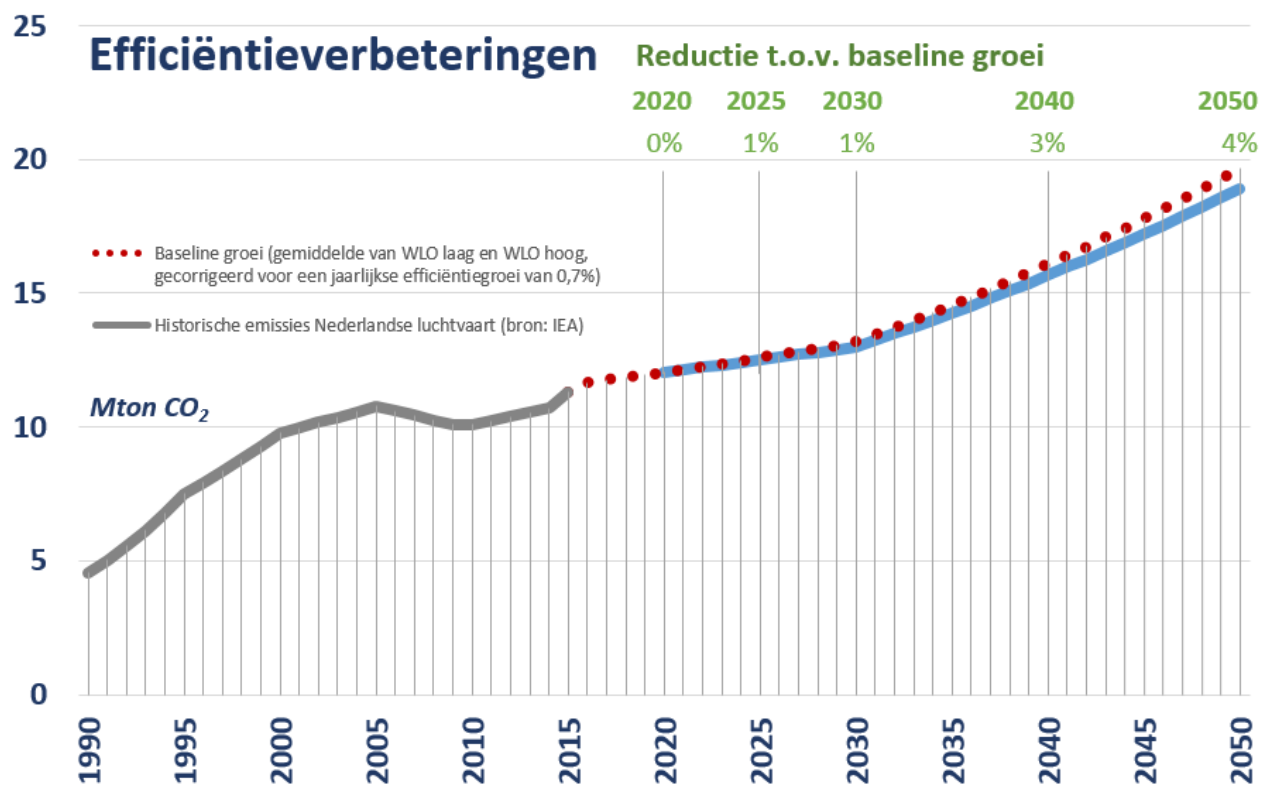
⁴¹ <http://www.taxibot-international.com/news-c1o4v>

⁴² <https://www.theguardian.com/travel/2016/feb/02/easyjet-plans-cut-carbon-emissions-hydrogen-fuel-cell-trial>

6) Efficiëntieverbeteringen

Toelichting maatregel

De brandstofefficiëntie per passagierskilometer wordt steeds hoger. Dit wordt bewerkstelligd door met name efficiëntere motoren, een hogere bezettingsgraad, betere aerodynamica en het gebruik van lichtere materialen. In de baseline wordt al gerekend met een gemiddelde efficiëntieverbetering van 0.7% per jaar, het gemiddelde van de afgelopen 5 jaar⁴³. Dit is een correctie van CE Delft (zie hoofdstuk 2.1) op de WLO Laag en Hoog baseline scenario's waarin wordt uitgegaan van een gemiddelde brandstof efficiëntieverbetering van respectievelijk 1,5% en 2,0% per jaar. De WLO-waardes liggen boven het langjarig gemiddelde tussen 1968 en 2014 van 1,3% per jaar⁷.



⁴³ https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Aircraft-FE-Trends_20150902.pdf

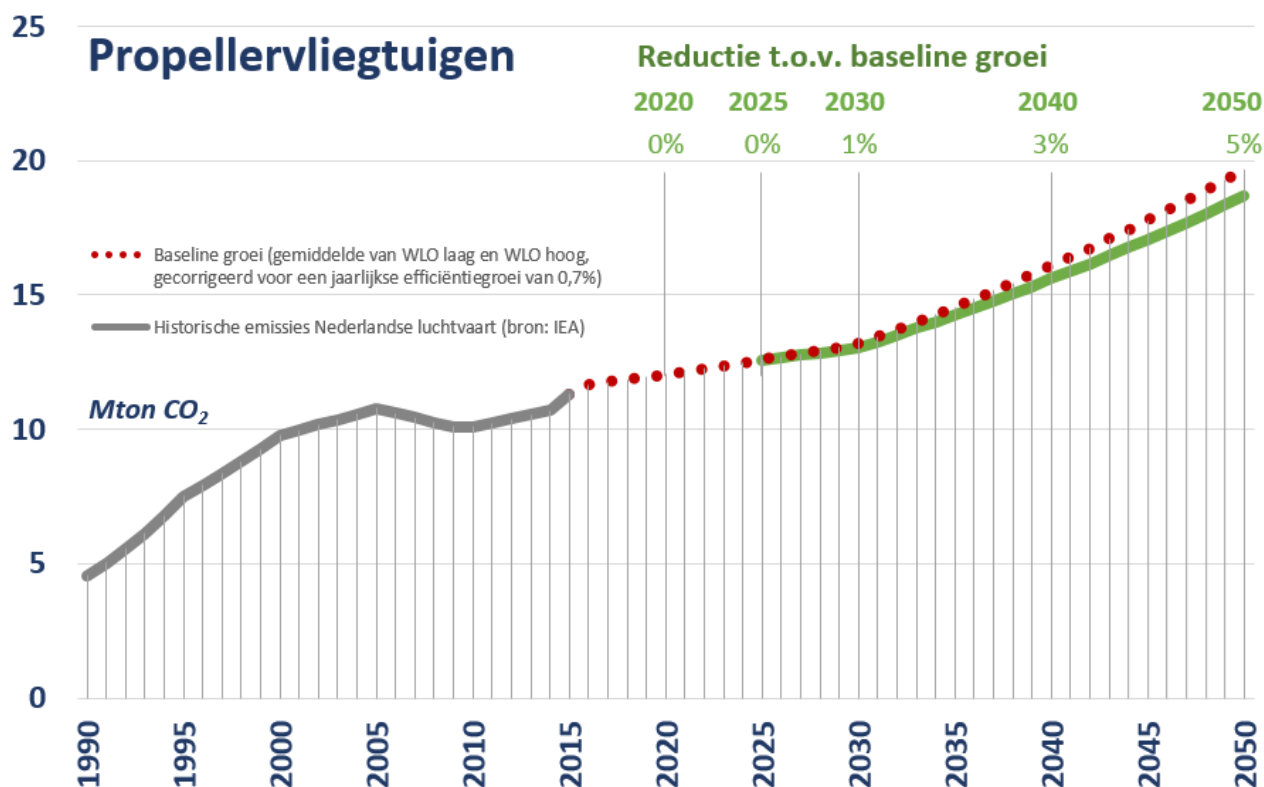
Efficiëntieverbeteringen	
Eerste besparing → 2020	Indien brandstofreductie sterk gestimuleerd wordt de komende jaren, is een efficiëntieverbetering boven de baseline vanaf 2020 mogelijk.
Bespaard in 2030 → 1%	De realistische reductie (rekening houdend met vervangingssnelheid van de vloot) is niet groter dan 0,82% per jaar. In de baseline is reeds gerekend met 0,7% per jaar. Bij introductie van de verhoging van 0,7% naar 0,82% in 2020 is de brandstofbesparing 4% in 2050 ten opzichte van de baseline. De maximale brandstof efficiëntieverbetering is gebaseerd op een studie van de Universiteit van München⁴⁴ waarin gekeken is naar de potentiële bijdrage van nieuwe motortechniek, lichtere materialen, betere aerodynamica en hogere vliegtuigbezettingsgraad aan de brandstof, rekening houdend met de turnover van de vloot. Hieruit zijn de volgende jaarlijkse reductiepercentages behorend bij het 'radicale' scenario berekend: • Motoren, aerodynamica, lichtgewicht materialen: 0,57%/jaar • Verbeterde bezettingsgraad en utilisation rate: 0,18%/jaar • Retrofit nieuwe technologie in bestaande vloot: 0,07%/jaar
Bespaard in 2050 → 4%	
Niet-CO₂ bijdrage klimaatverandering	Efficiëntieverbeteringen resulteren in minder brandstofverbruik, zowel in de LTO-cyclus als op kruishoogte. Het grootste deel van de brandstof wordt op kruishoogte verbrand. In dezelfde verhouding worden door efficiëntieverbeteringen de overige radiative forcing effecten vermeden.
Facts & figures	• De brandstofprijs is een belangrijke driver voor verbetering van de brandstofefficiëntie. In jaren waarin de brandstofprijs laag is, stukt de efficiëntieverbetering om weer aan te trekken als de brandstofprijs stijgt⁴³.

⁴⁴ Ploetner et al. 2017, *Technological and Operational Scenarios on Aircraft Fleet-Level towards ATAG and IATA 2050 Emission Targets*

7) Propellervliegtuigen

Toelichting maatregel

Het voordeel van propellervliegtuigen (turboprops) is dat ze efficiënter zijn dan straalmotoren, tot circa 20%⁴⁵. Daar staat tegenover dat de maximumsnelheid lager ligt. Ze zijn daarom vooral geschikt voor kortere vluchten, tot ongeveer 500 km is er nauwelijks tijdverlies⁴⁶. Propellervliegtuigen produceren ook meer geluid waardoor er vanwege de geluidsrestricties weinig interesse voor is.



⁴⁵ <https://www.theicct.org/blogs/staff/back-future-return-turboprop>

⁴⁶ <https://www.luchtvaartnieuws.nl/nieuws/categorie/72/algemeen/zuinige-turboprop-blijkt-nauwelijks-langzamer-dan-regional-jet>

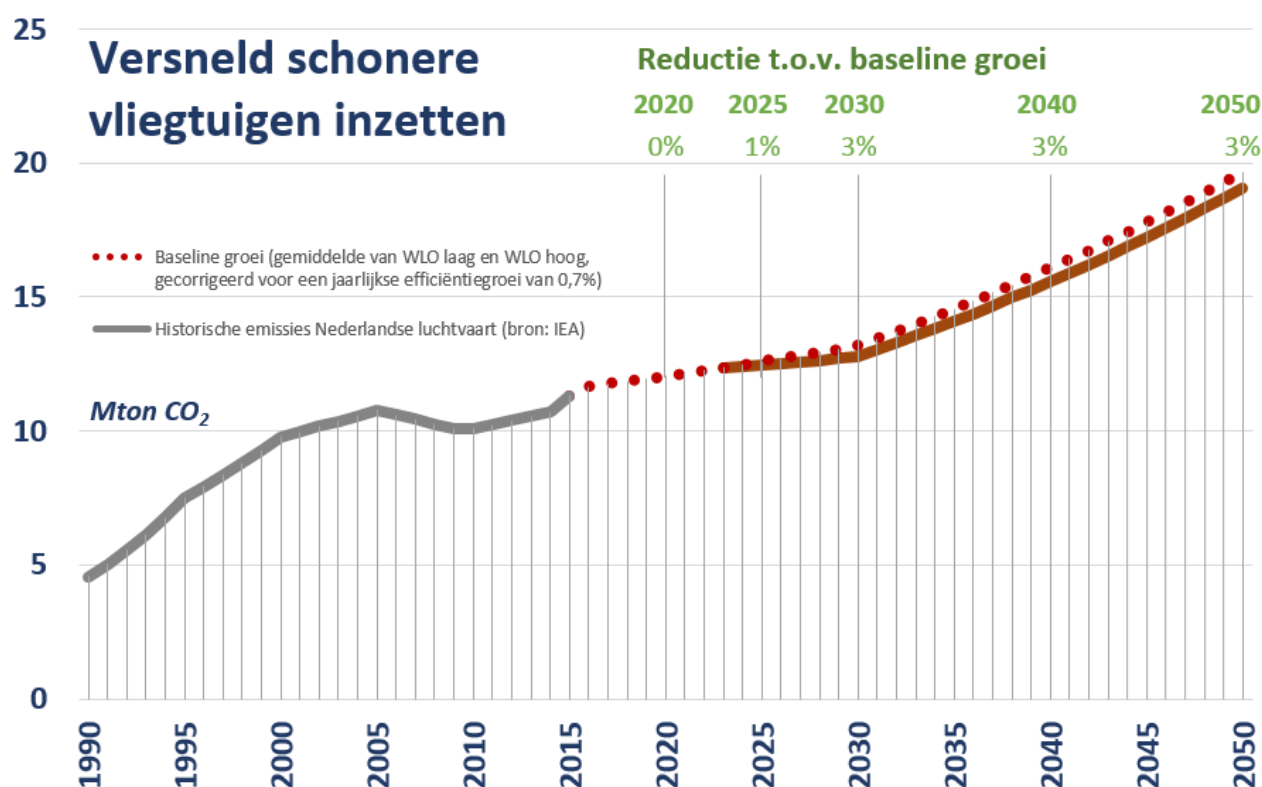
Propellervliegtuigen	
Eerste besparing → 2025	Omdat er weinig vraag is naar propellervliegtuigen gaat de ontwikkeling de laatste jaren minder hard. Om echt 20% te besparen ten opzichte van straalvliegtuigen is een nieuw ontwerp nodig ⁴⁷ . Van design tot delivery wordt 7 jaar gerekend, waardoor met een CO ₂ -reductie vanaf 2025 wordt gerekend.
Bespaard in 2030 → 1% Bespaard in 2050 → 5%	Indien op alle vluchten binnen de EU uiteindelijk propellervliegtuigen zouden worden ingezet (intra-EU vluchten zijn goed voor 25% van de CO ₂ -emissies ³⁰) dan leidt dat tot een besparing ten opzichte van de baseline van 5%. Bij een fleet-turnover tijd van 25 jaar wordt deze maximale reductie van 5% in 2050 bereikt.
Niet-CO₂ bijdrage klimaatverandering	Propellervliegtuigen gebruiken minder brandstof dan straalvliegtuigen, zowel in de LTO-cyclus als op kruishoogte. Het grootste deel van de brandstof wordt op kruishoogte verbrand. In dezelfde verhouding worden door efficiëntieverbeteringen de overige radiative forcing effecten vermeden.
Facts & figures	- De Bombardier Q400 is een nieuw propellervliegtuig dat op relatief korte afstanden qua prestatie in de buurt komt van straalvliegtuigen. De kruissnelheid is 667 km/u en de maximale afstand 2.522 km. - Een hogere brandstofprijs maakt het kostenvoordeel ten opzichte van straalvliegtuigen groter en kan de vraag naar propellervliegtuigen doen stijgen.

⁴⁷ Communicatie Joris Melkert (TU Delft)

8) Versneld schonere vliegtuigen inzetten

Toelichting maatregel

De vliegtuigvloot bestaat uit een mix van jonge en oude vliegtuigen. Door oude vliegtuigen versneld te vervangen wordt de vloot jonger en de gemiddelde brandstofefficiëntie van de vloot groter. Het effect van deze maatregel op de netto CO₂-reductie hangt af van de bestemming van de in Nederland vervroegd uitgefaseerde vliegtuigen. Als deze vliegtuigen elders worden ingezet en hun totale levensduur niet wordt verkort dan draagt de maatregel niet bij aan het tegengaan van klimaatverandering.



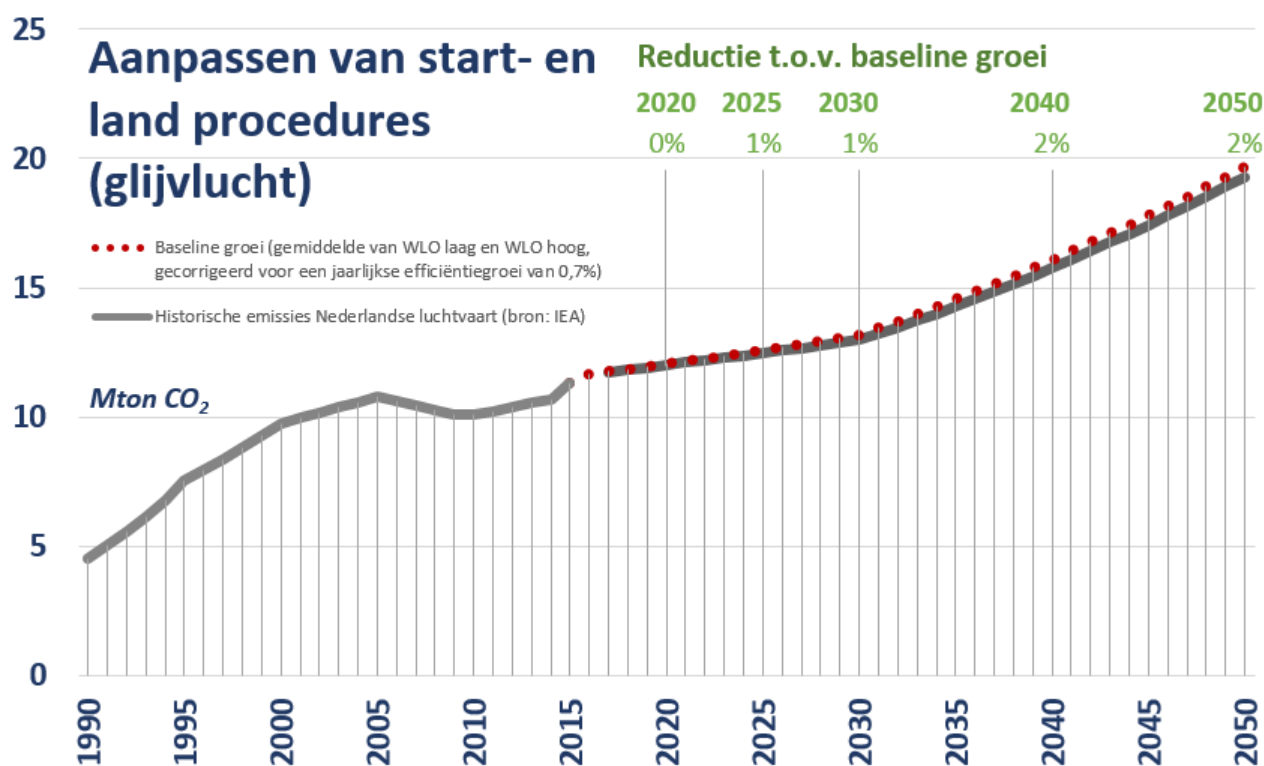
Versneld schonere vliegtuigen gebruiken	
Eerste besparing → 2023	Rekening houdend met 5 jaar beleidsvoorbereiding kan de maatregel in 2023 effect sorteren op de CO ₂ -uitstoot van de Nederlandse luchtvaart.
Bespaard in 2030 → 3% Bespaard in 2050 → 3%	Indien versneld wordt uitgefaseerd is een maximale besparing van 3% ten opzichte van de baseline haalbaar. Deze besparing wordt bereikt zodra de gemiddelde leeftijd van de vloot is teruggebracht van 11 jaar naar 7 jaar. De gemiddelde leeftijd van de vloot op Schiphol is 11,2 jaar ⁴⁸ . De prijsvechters hebben een gemiddeld jongere vloot (9,0 jaar), waarbij Vueling koploper is met 7,3 jaar. Onder de aanname dat brandstofefficiency van nieuwe vliegtuigen jaarlijks met 0.82% toeneemt (zie maatregel 6), zou dat een besparing van 3,2% ten opzichte van de baseline opleveren.
Niet-CO₂ bijdrage klimaatverandering	Versneld schonere vliegtuigen inzetten leidt tot brandstofbesparing, zowel in de LTO-cyclus als op kruishoogte. Het grootste deel van de brandstof wordt op kruishoogte verbrand. In dezelfde verhouding worden door efficiëntieverbeteringen de overige radiative forcing effecten vermeden.
Facts & figures	- De leeftijd van de vloot van KLM (11,2 jaar) is gelijk aan het gemiddelde van Schiphol. De uitschieter naar boven is Delta Airlines (16,6 jaar). Vueling heeft met een gemiddelde van 7,3 jaar de jongste vloot. - Om een jongere vloot mogelijk te maken helpt het als de brandstofprijzen hoog zijn. Voor het versneld afschrijven is (start)kapitaal nodig, maar ook leaseconstructies zouden een rol kunnen spelen in het verjongen van de vloot. - Beleidsmaatregelen om vervuilende en lawaaiige vliegtuigen te weren zullen bijdragen aan versnelling van de vlootvernieuwing.

⁴⁸ www.planespotters.net

9) Aanpassen van start- en land procedures (glijvlucht)

Toelichting maatregel

Continu stijgen en continu dalen (Continuous Climb and Descent Operations – CCO en CDO) doelt op een optimale start en landing vanuit brandstofefficiëntie oogpunt. Tijdens het stijgen (CCO) wordt optimale stuwkracht geleverd door de motoren zodat het vliegtuig snel op de meer efficiëntere kruishoogte vliegt. Bij het dalen (CDO) wordt minimale stuwkracht geleverd en met weinig 'drag' gevlogen. Met deze stijg- en daaltechnieken kan op brandstof en dus CO₂-emissies bespaard worden. CDO kan ook 1-5 dB stiller zijn dan de huidige praktijk⁴⁹.



⁴⁹ <https://www.eurocontrol.int/articles/continuous-climb-and-descent-operations>

Aanpassen van start- en land procedures	
Eerste besparing → 2016	CDO wordt in de nacht op Schiphol toegepast de geluidhinder te beperken. Er zijn vaste vliegroutes voor de Polderbaan en Kaagbaan waarmee dichtbevolkte gebieden worden ontzien. Om logistieke- en veiligheidsredenen gebeurt dat niet overdag ⁵⁰ . Aanpassing van de routes en start- en landingsprocedures is een complexe aangelegenheid. Onder andere vanuit SESAR (zie volgende maatregel) wordt hier continue aan gewerkt. In werkelijkheid zullen besparingen sprongsgewijs plaatsvinden met de invoering van aanpassingen. Voor de berekening van het CO ₂ -reductiepotentieel is aangenomen dat de effecten direct beginnen, maar heel geleidelijk hun maximale potentie bereiken.
Bespaard in 2030 → 1%	De gecombineerde brandstofbesparing van CCO en CDO wordt binnen Europa geschat op 50 – 200 ton kerosine per vlucht (0,8% – 3,1% van het brandstofverbruik per vlucht) ⁴⁹ . Vanwege de nachtelijke toepassing van CDO op Schiphol en de beperkte mogelijkheden om CCO en CDO 24/7 toe te passen is voor de maximum besparing de helft hiervan genomen (125 ton per vlucht). Op basis van de ruim 590.000 vluchtbewegingen in 2017 ² komt de CO ₂ -besparing op 2% ten opzichte van de baseline. Aangenomen is dat na introductie de maximale potentie in 2035 wordt bereikt.
Bespaard in 2050 → 2%	
Niet-CO₂ bijdrage klimaatverandering	Het aanpassen van de start- en landprocedures leidt tot brandstofbesparing in de LTO-cyclus. Overige radiative forcing effecten worden hier niet mee vermeden (maar die treden ook niet op bij de baseline LTO-emissies).
Facts & figures	- In 2015 is gestopt met het 's nachts tegelijkertijd gebruiken van een westelijke en oostelijke aanvliegeroute omdat de software ontoereikend was om dat veilig uit te voeren. Vanaf 2021 zou daar verandering in kunnen komen⁵¹. Hierdoor hoeft minder omgevlogen te worden en kan op brandstof worden bespaard. - Volledige CDO en CCO implementatie is voor Schiphol niet realistisch vanwege de drukte en geluidsbeperkingen.

⁵⁰ <https://www.lvn.nl/omgeving/vragen-over-routegebruik>

⁵¹ <https://www.noordhollandsdagblad.nl/nieuws/nachtvluchten-schiphol-niet-over-hele-provincie>

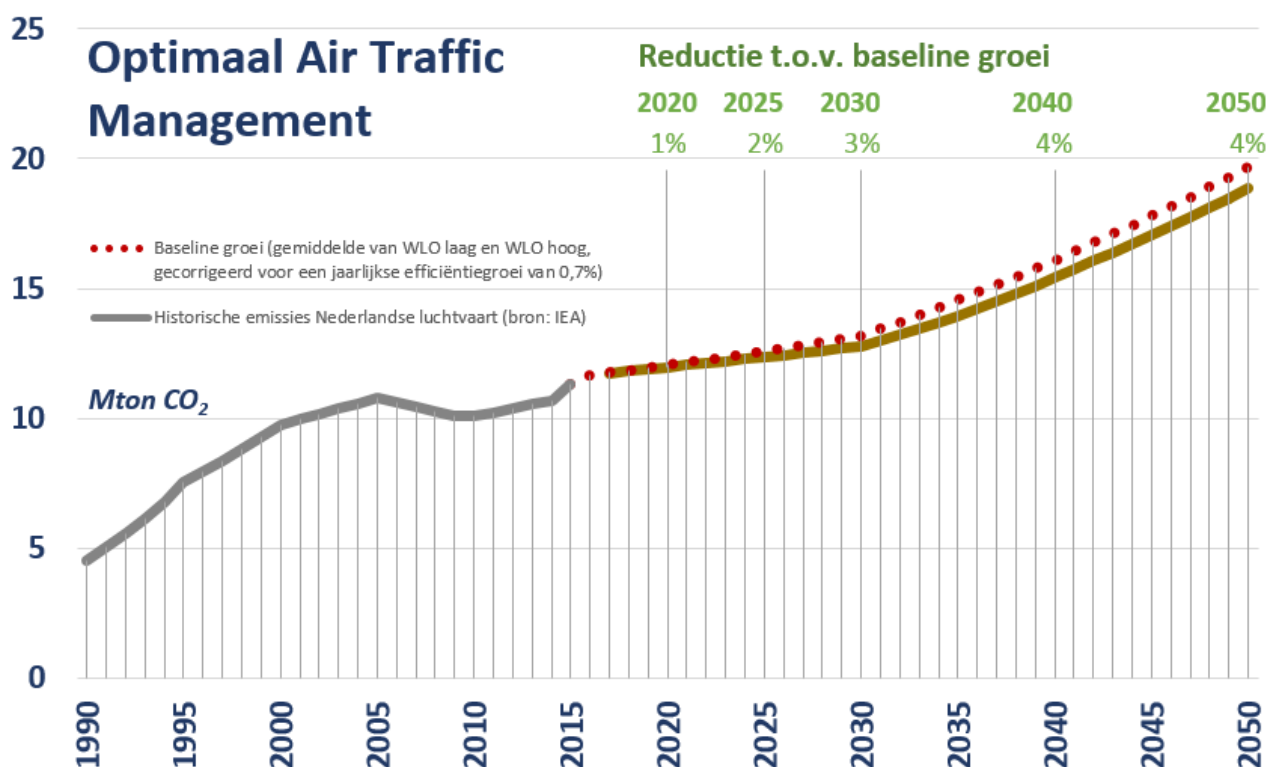
10) Optimaal Air Traffic Management

Toelichting maatregel

Elk land in Europa heeft zijn eigen luchtverkeersleiding voor het nationale luchtruim. Dit leidt tot suboptimale routes en vertragingen. Europa kent sinds 2004 aan samenwerkingsinitiatief genaamd “Single European Sky Air Traffic Management Research” (SESAR) dat voortkomt uit het Single European Sky (SES) beleid van de Europese Commissie. Het SES heeft vier doelstelling:

1. Een verdrievoudiging van Air Traffic Managementsystemen
2. Een halvering van de Air Traffic Management kosten
3. Een toename van de veiligheid met een factor 10
4. De milieu-impact met 10% per vlucht reduceren

Op dit laatste punt is de impact van deze maatregel gebaseerd. De doelstelling is pan-Europees maar de daadwerkelijk bereikte reductie zal niet in elk land en voor elke luchthaven even groot zijn. In deze studie zijn regionale verschillen niet meegenomen.



Optimaal Air Traffic Management	
Eerste besparing → 2016	Het SESAR-programma is doorlopend en wanneer maatregelen worden doorgevoerd (met effect in Nederland) is in deze studie niet onderzocht. Voor de berekening van het CO ₂ -reductiepotentieel is aangenomen dat de effecten vanaf 2016 beginnen (of eigenlijk doorlopen omdat het programma al in 2004 is gestart), maar geleidelijk hun maximale potentie bereiken.
Bespaard in 2030 → 3% Bespaard in 2050 → 4%	Het officiële Single European Sky (SES) target is 10% CO₂-reductie tussen 2005 en 2035 door de ontwikkeling van innovatieve technologische en operationele oplossingen voor efficiënter Air Traffic Management⁵². De 10% is uitgesplitst in de volgende componenten: • Vóór de start: 0,4% • Start: 2,0% • Vlucht: 2,0% • Landing: 2,5% • Na de landing: 0,1% • Non SESAR R&D invloeden: 3,0% Binnen SESAR was het doel om in 2016 op 2,8% reductie te zitten voor het gate-to-gate gedeelte. De non-SESAR R&D invloeden worden verder niet gespecificeerd. Omdat het ook om niet-bindende doelstellingen gaat, is voor het reductiepotentieel voor optimaal Air Traffic Management uitgegaan van 4,2% (10,0% - 2,8% - 3,0%).
Niet-CO₂ bijdrage klimaatverandering	Optimaal Air Traffic Control leidt tot brandstofbesparing, zowel in de LTO-cyclus als op kruishoogte. Het grootste deel van de brandstofbesparing vindt in de LTO-cyclus plaats. Van de 4,2% besparing in 2050 ten opzichte van de baseline komt 1/3 (1,2%) voor rekening van CO ₂ -emissies op kruishoogte. Alleen voor dat deel worden met Optimaal Air Traffic Control ook de overige radiative forcing effecten vermeden.
Facts & figures	• Uit tests in het Maastricht Airspace Control Centre kwam naar voren dat 'free routing' de afgelegde afstanden per vlucht tot 5% kunnen verkorten⁵³. • Tests op Parijs Charles de Gaulle omtrent de optimalisatie van het gebruik van de landingsbanen hebben aangetoond dat 10% taxijsd verkorting en 20% wachttijd verkorting op de startbaan mogelijk is. Voor korte vluchten zou dat op kunnen lopen tot 10% van het brandstofverbruik⁵³.

⁵² https://www.trafi.fi/filebank/a/1467201195/64e93e85219b03b2c7b3ff96ef0224c2/21988-State_Action_Plan_Finland_2016.pdf

⁵³ https://www.sesarju.eu/sites/default/files/SESAR_Leaflet_21x21_WEB.PDF



With its headquarters in Amersfoort, The Netherlands, Royal HaskoningDHV is an independent, international project management, engineering and consultancy service provider. Ranking globally in the top 10 of independently owned, nonlisted companies and top 40 overall, the Company's 6,000 staff provide services across the world from more than 100 offices in over 35 countries.

Our connections

Innovation is a collaborative process, which is why Royal HaskoningDHV works in association with clients, project partners, universities, government agencies, NGOs and many other organisations to develop and introduce new ways of living and working to enhance society together, now and in the future.

Memberships

Royal HaskoningDHV is a member of the recognised engineering and environmental bodies in those countries where it has a permanent office base.

All Royal HaskoningDHV consultants, architects and engineers are members of their individual branch organisations in their various countries.

Integrity

Royal HaskoningDHV is the first and only engineering consultancy with ETHIC Intelligence anti-corruption certificate since 2010.



royalhaskoningdhv.com

