# De potentie van synthetische kerosine als alternatieve brandstof voor de luchtvaart

## Milieu-, klimaat-, financiële, infrastructurele en technologische gevolgen van het gebruik van verschillende typen synthetische kerosine als vliegtuigbrandstof

ADVIESRAPPORT

InCompany Milieuadvies

BERNARD GERARD, BARBARA HERBSCHLEB, REMCO KISTEMAKER, REMO SNIJDER

ONDERZOEK UITGEVOERD IN OPDRACHT VAN BERAAD VLIEGHINDER MOET MINDER (BVM2), EINDHOVEN
EINDHOVEN, mrt-19

Open Universiteit
www.ou.nl

# Colofon

| | |
|---|---|
| **Naam document** | NB9906-PWAE-IM2018nj-M010.docx |
| **Opdrachtgever** | Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van Beraad Vlieghinder Moet Minder (BVM2), Eindhoven, contactpersoon: Prof. Dr. Ir. K. (Klaas) Kopinga. |
| **Uitgave** | InCompany Milieuadvies,<br>faculteit Natuurwetenschappen,<br>Open Universiteit,<br>Postbus 2960,<br>6401 DL Heerlen, NL.<br>www.ou.nl/nw |
| **Projectteam (auteurs)** | Bernard Gerard, Barbara Herbschleb, Remco Kistemaker, Remo Snijder |
| **Projectteam (nummer)** | M010, Kerosine, IM2018nj |
| **Projectcoach (docent)** | Dr. Wilfried Ivens, Open Universiteit – InCompany Milieuadvies |
| **Datum (laatst bijgewerkt)** | 15-3-2019 0:22 |
| **Status** | ☐in bewerking<br>☐voor review (intern: team/projectcoach; extern: opdrachtgever)<br>☐ter beoordeling<br>☒definitief |
| | InCompany Milieuadvies hanteert de APA 5th Style als norm voor haar wetenschappelijke rapportages. |


| | |
|---|---|
| **Copyright** | © 2019 Open Universiteit, Heerlen |
| | De auteursrechten op dit materiaal berusten bij de Open Universiteit. Behoudens uitzonderingen door de Wet gesteld mag zonder schriftelijke toestemming van de rechthebbende(n) op het auteursrecht niets uit deze uitgave worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of anderszins, hetgeen ook van toepassing is op de gehele of gedeeltelijke bewerking.<br>Copyright on this material is vested in the Open Universiteit. Save exceptions stated by the law no part of this publication may be reproduced in any form, by print, photoprint, microfilm or other means, included a complete or partial transcription, without the prior written permission of the publisher. |
| **InCompany Milieuadvies** | InCompany Milieuadvies is het online milieuadviesbureau van de Open Universiteit (www.ou.nl). Studenten werken in teamverband aan echte milieuopdrachten van echte opdrachtgevers. Leren en werken zijn één in deze bijzondere cursus, die de afronding vormt van de wetenschappelijke Bachelor-of-Science opleiding Milieu-natuurwetenschappen |

# Projectgegevens

| | |
|---|---|
| **Titel (nl)** | **De potentie van synthetische kerosine als alternatieve brandstof voor de luchtvaart** (Milieu-, klimaat-, financiële, infrastructurele en technologische gevolgen van het gebruik van verschillende typen synthetische kerosine als vliegtuigbrandstof). |
| **Title (in English)** | **The potential of synthetic kerosene as an alternative fuel for aviation** (Environmental, climate, financial, infrastructural and technological impacts of the use of different types of synthetic kerosene as jet fuel). |
| **Opdrachtgevende instantie** | Onderzoek uitgevoerd in opdracht van Beraad Vlieghinder Moet Minder (BVM2), Eindhoven, NL |
| **Opdrachtgever** | Prof. Dr. Ir. K. (Klaas) Kopinga, BVM2, Eindhoven, NL |
| **Omschrijving opdracht (nl)** | Onderzoek naar effecten van alternatieve voortstuwingsbrandstoffen voor vliegtuigen die zich ongeveer gelijk gedragen als conventionele kerosine en eventueel daarmee mengbaar zijn zonder grote aanpassingen van motoren, en die minder nadelige milieueffecten (toxische emissies en klimaat) hebben. |
| **Description of the order (in English)** | Research into impacts of alternative propulsion fuels for aircraft, that behave similarly to conventional kerosene and are possibly miscible with it without major engine modifications, and that have less adverse environmental effects (toxic emissions and climate). |
| **Trefwoorden** | Kerosine, synthetische kerosine, biobrandstoffen, hernieuwbare vliegtuigbrandstoffen, Power to Liquid brandstoffen, Gas/Coal to Liquid brandstoffen (GTL/CTL), synthetische paraffine kerosine (SPK) |
| **Key words** | Kerosene, synthetic kerosene, biofuels, renewable jet fuels (RJF), Power-to-Liquid (PTL) fuels, electrofuels, Gas/Coal-to-Liquid (GTL/CTL) fuels, Synthetic Paraffinic Kerosene (SPK) |
| **Betrokkene(n) bij opdrachtgevers-organisatie** | Prof. Dr. Ing. K. (Klaas) Kopinga, De Speldenmaker 23, 5506CE Veldhoven, inhoudelijk begeleider, berichten via de mail |
| **Projectleider team IM** | Bernard Gerard, cursus Virtueel milieuadviesbureau 2, NB9906, 851271849, wo-bachelor Milieu-natuurwetenschappen (B.Sc.), Hulstbosakker 21, 5625VR Eindhoven; projectleider |
| **Projectmedewerker team IM** | Barbara Herbschleb, cursus Virtueel milieuadviesbureau 2, NB9906, 850140628, wo-bachelor Milieu-natuurwetenschappen (B.Sc.), Huismanstraat 27, 3082HJ Rotterdam; projectmedewerker |
| **Projectmedewerker team IM** | Remco Kistemaker, cursus Virtueel milieuadviesbureau 2, NB9906, 835219349, wo-bachelor Milieu-natuurwetenschappen (B.Sc.), Veldesebosweg 6, 7231 DW, Warnsveld; projectmedewerker |
| **Projectmedewerker team IM** | Remo Snijder, cursus Virtueel milieuadviesbureau 2, NB9906, 850195831, wo-bachelor Milieu-natuurwetenschappen (B.Sc.), Zeekant 103K, 2586JJ Den Haag; projectmedewerker en contactpersoon met opdrachtgever |
| **Projectcoach** | Dr. Wilfried Ivens, faculteit Management, Science & Technology, Vakgroep Science, Open Universiteit, Heerlen, NL |
| **Examinator** | Dr. Wilfried Ivens, faculteit Management, Science & Technology, Vakgroep Science, Open Universiteit, Heerlen, NL |
| | |
| **Referentie naar dit rapport** | Gerard, B., Herbschleb, B., Kistemaker, R., & Snijder, R. (2019). De potentie van synthetische kerosine als alternatieve brandstof voor de luchtvaart. Onderzoek uitgevoerd in opdracht van Beraad Vlieghinder Moet Minder (BVM2), Eindhoven, NL. [The potential of synthetic kerosene as an alternative fuel for aviation]. Unpublished student paper, Open Universiteit, Heerlen, NL. |

# Inhoud

Colofon ..... 2
Projectgegevens ..... 3
Inhoud ..... 4
Voorwoord ..... 6
Abstract en managementsamenvatting ..... 7
Samenvatting ..... 8
1. Inleiding ..... 9
1.1. Achtergrondinformatie ..... 9
1.2. Het probleem ..... 11
1.3. Vraagstelling ..... 12
1.4. Doelstelling ..... 12
1.5. Kenmerken (criteria) resultaten ..... 13
1.6. Randvoorwaarden en afbakening ..... 13
2. Methode: onderzoeksopzet ..... 14
2.1. Onderzoeksopzet ..... 14
2.2. Onderzoeksmethode ..... 14
2.2.1. 'Grijze' literatuur ..... 14
2.2.2. Systematisch literatuuronderzoek ..... 15
2.2.3. Data-analyse ..... 15
3. Kenmerken en productiewijzen van kerosines ..... 16
3.1. Kerosine als eindproduct ..... 16
3.2. Herkomst van kerosine ..... 17
3.3. Ruwe olie als grondstof ..... 17
3.4. Fischer-Tropsch procédé, GTL en CTL ..... 18
3.5. PTL of electrofuels ..... 19
3.6. Biokerosine ..... 20
4. Resultaten ..... 22
4.1. Toxische emissies ..... 22
4.1.1. Inleiding ..... 22
4.1.2. Reacties van conventionele kerosine in een straalmotor ..... 22
4.1.3. Macroscopische determinanten ..... 24
4.1.4. Milieugevolgen conventionele en alternatieve kerosine ..... 24
4.2. Lifecycle $CO_{2,eq}$-emissies ..... 27
4.2.1. Algemeen ..... 27
4.2.2. GTL- en CTL-kerosine ..... 29
4.2.3. Biokerosine ..... 29
4.2.4. PTL-kerosine ..... 30
4.3. De prijs van synthetische kerosine ..... 31
4.3.1. Inleiding ..... 31
4.3.2. Kerosineprijzen ..... 31
4.3.2.1 Conventionele kerosine ..... 31
4.3.2.2 Gas To Liquid (GTL) en Coal To Liquid (CTL) kerosine ..... 32
4.3.2.3 Biokerosine ..... 32
4.3.2.4 Power To Liquid-kerosine ..... 33
4.3.3. Ticketprijzen ..... 34
4.4. Gevolgen voor vliegtuigen en infrastructuur ..... 35
4.4.1. Gevolgen voor vliegtuigen ..... 35
4.4.1.1 Aanpassing vliegtuigen ..... 35
4.4.1.2 Achtergronden bijmengen ..... 35
4.4.2. Gevolgen voor infrastructuur vliegvelden ..... 36
4.5. Gevolgen voor land/watergebruik en voedselproductie ..... 37
4.5.1. Conventionele, GTL- en CTL-kerosine ..... 37
4.5.2. Biokerosine ..... 37
4.5.3. PTL-kerosine ..... 38
4.6. Beschikbaarheid naar volume en tijd ..... 39
4.6.1. CTL-kerosine ..... 39
4.6.2. GTL-kerosine ..... 39
4.6.3. Biokerosine ..... 41
4.6.4. Power-to-Liquid ..... **Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.**

5. Discussie en conclusies ..... 45
5.1. Discussie ..... 45
5.2. Conclusies ..... 48
6. Aanbevelingen ..... 49
6.1. Algemene wetenschappelijke aanbevelingen ..... 49
6.2. Aanbevelingen voor BVM2 ..... 49
Literatuur ..... 50
Bijlage A Verzamelstaat met samenvattingen gebruikte literatuur ..... 55

# Voorwoord

Dit rapport bevat het verslag van een onderzoek uitgevoerd in opdracht van Beraad Vlieghinder Moet Minder (BVM2). Het betreft een onderzoek naar alternatieve vliegtuigbrandstoffen die zonder grote aanpassingen van motoren mengbaar zijn met conventionele kerosine, en die minder milieueffecten (toxische emissies en klimaat) hebben.

# Abstract en managementsamenvatting

Aviation is growing rapidly. Aircraft are deteriorating air quality around airports. Through their emissions, also at cruising altitude, they heat up the atmosphere. The growth in greenhouse gas emissions conflicts with the Paris climate ambition. This literature study shows that synthetic aviation fuels (Gas To Liquid, biokerosene and Power To Liquid) can contribute to less air pollution around airports due to ultra-fine dust, soot and benzene. Biokerosene and PTL kerosene (if produced with sustainable electricity) can also lead to lower greenhouse gas emissions. Currently, all synthetic kerosenes are only very poorly available, mainly because it is significantly more expensive than conventional kerosene. Production is not getting under way and too few economies of scale can be achieved. In addition, PTL kerosene is only at the beginning of its technical development. The amount of biokerosene is also limited by the availability of sufficient biomass and by competitive demand for this biomass from other sectors. EU legislation and self-regulation ensure that no food is used for biokerosene, and aim to avoid indirect damage to food production, biodiversity and vulnerable nature. Large areas are needed for both renewable electricity production and biomass production. This leads to difficult balancing processes with other claims on these surfaces. This study is intended to gather the available knowledge in an overview and to make it publicly accessible. It is advisable to aim for a wider use of synthetic kerosene by influencing policy. The client is the Beraad Vlieghinder Moet Minder (BVM2) near Eindhoven Airport.

De luchtvaart groeit snel. Vliegtuigen verslechteren de luchtkwaliteit rond vliegvelden. Via hun emissies, ook op kruishoogte, warmen ze de atmosfeer op. De groei van de broeikasgasemissies conflicteert met de Parijse klimaatambitie. In deze literatuurstudie komt naar voren dat synthetische vliegtuigbrandstoffen (Gas To Liquid, biokerosine en Power To Liquid) kunnen bijdragen aan minder luchtvervuiling rond vliegvelden door ultrafijn stof, roet en benzeen. Ook kunnen biokerosine en PTL-kerosine (mits met duurzame stroom geproduceerd) tot een lagere emissie van broeikasgassen leiden. Alle synthetische kerosinesoorten zijn momenteel slechts zeer beperkt beschikbaar, vooral omdat ze beduidend duurder zijn dan conventionele kerosine. De productie komt niet op gang en er kunnen te weinig schaalvoordelen gerealiseerd worden. Daarnaast staat PTL-kerosine nog slechts aan het begin van zijn technische ontwikkeling. De hoeveelheid biokerosine wordt ook beperkt door de beschikbaarheid van voldoende biomassa en door concurrerende vraag naar deze biomassa vanuit andere sectoren. EU-wetgeving en zelfregulatie verzekeren dat geen voedsel ingezet wordt ten behoeve van biokerosine, en beogen een indirecte aantasting van de voedselproductie en van biodiversiteit en kwetsbare natuur te vermijden. Zowel voor de productie van duurzame elektriciteit als voor de productie van biomassa zijn grote oppervlaktes nodig. Dat leidt tot moeilijke afwegingsprocessen met andere claims op deze oppervlaktes. Deze studie is bedoeld om de beschikbare kennis in een overzicht bijeen te brengen en publiek toegankelijk te maken. Het verdient aanbeveling om door beleidsbeïnvloeding een ruimere inzet van synthetische kerosine na te streven. Opdrachtgever is het Beraad Vlieghinder Moet Minder (BVM2) nabij Eindhoven Airport.

# Samenvatting

Tijdens het verbrandingsproces van kerosine worden broeikasgassen en toxische stoffen uitgestoten of gevormd die respectievelijk het klimaat (mondiaal) en de gezondheid van de mens (lokaal) ongunstig kunnen beïnvloeden. Eén van de mogelijkheden om het gebruik van conventionele kerosine (gebaseerd op ruwe olie) en de negatieve effecten daarvan te verminderen, is het aanpassen van de vliegtuigbrandstof, bijvoorbeeld in de vorm van synthetische kerosine (niet gebaseerd op ruwe olie).

Een duidelijk overzicht waarin de resultaten van recente onderzoeken zijn verzameld voor synthetische kerosine ontbreekt nog. Daartoe is in opdracht van Beraad Vlieghinder Moet Minder (BVM2) een literatuuronderzoek uitgevoerd. Dit onderzoek is gericht op de emissie van toxische stoffen en $CO_2$,eq over de gehele levenscyclus (in vergelijking met conventionele kerosine), de kosten, de eventueel benodigde aanpassingen van vliegtuigen en infrastructuur, de gevolgen voor landgebruik en voedselproductie en de beschikbaarheid naar volume en tijd.

In het adviesrapport worden de synthetische kerosinesoorten GTL (Gas-to-Liquid), CTL (Coal-to-Liquid), biokerosine (feedstock biomassa) en PTL (Power-to-Liquid) besproken. Elk type heeft sterke en zwakke punten. Hieronder staan kort samengevat de belangrijkste onderzoeksresultaten.

- Synthetische kerosine heeft ten opzichte van conventionele kerosine onmiskenbaar voordelen voor de luchtkwaliteit in de omgeving van vliegvelden. De afwezigheid van zwavel en (als regel) aromaten in synthetische kerosine leidt tot lagere emissies van ultrafijnstof en roet.
- Biokerosine en PTL-kerosine hebben ten opzichte van conventionele kerosine voordelen voor het klimaat. De Life Cycle emissie van broeikasgassen is (veel) lager. Die van GTL- en CTL-kerosine liggen (iets) hoger dan bij conventionele kerosine.
- Alle synthetische kerosinesoorten zijn duurder dan conventionele kerosine. GTL- en CTL-kerosine zijn ongeveer 25% duurder, biokerosine ongeveer 2 tot 4 keer zo duur en PTL-kerosine ongeveer 6 keer zo duur.
- Momenteel is het niet mogelijk volledig op synthetische kerosine te vliegen: dit vereist andere brandstofpakkingen. De gevolgen van synthetische kerosine voor vliegtuigmotoren zijn bij de gegeven bijmengregels afwezig.
- De gevolgen van synthetische kerosine voor de infrastructuur en het beheer van vliegvelden zijn gering en oplosbaar, of zelfs afwezig.
- Problemen met de voedselproductie zouden vooral kunnen ontstaan bij biokerosine. De Europese regelgeving en de zelfregulatie van de sector hebben het risico op ongewenst landgebruik en op schade aan de voedselproductie verkleind, maar niet tot nul.
  Voor duurzame productie van PTL-kerosine op grote schaal (wat theoretisch kan) is wel een aanzienlijke hoeveelheid land nodig voor de opwekking van zonne- en/of windenergie.
- Er is en blijft duidelijk te weinig GTL-kerosine en biokerosine om alleen daarmee de luchtvaartgebonden vraagstukken van milieu en klimaat op te lossen. PTL heeft misschien wel de potentie om op lange termijn de luchtvaart te kunnen voorzien van voldoende synthetische kerosine. PTL staat echter nog aan het begin van de technische ontwikkeling.

Conclusie is dat de onderzochte synthetische kerosinesoorten schoner verbranden en minder toxische stoffen uitstoten. Dit kan vooral op lokaal niveau van de omgeving van vliegvelden gunstig uitpakken. Biokerosine en Power-to-Liquid kerosine zijn meer ‘duurzame ‘ vormen van synthetische kerosine dan Gas-to-Liquid en (vooral) Coal-to-Liquid, die gebaseerd zijn op fossiele brandstoffen. Om van synthetische kerosine een succes te maken, zullen overheden randvoorwaarden moeten scheppen (waaronder financiële) waaronder synthetische kerosine zich, op de lange termijn, kan ontwikkelen tot volwaardig alternatief voor conventionele kerosine.

# 1.Inleiding

## 1.1. Achtergrondinformatie

Reizen per vliegtuig heeft als voordeel dat het reistijden kan verkorten en moeilijk toegankelijke gebieden bereikbaar kan maken in vergelijking met reizen via land of water. Een nadeel van vliegverkeer is dat het de luchtkwaliteit vermindert en het klimaat beïnvloedt door emissies als gevolg van gebruik van fossiele kerosine (Brunelle-Yeung et al., 2014; Kapadia et al., 2016; Morita, Yang, Unger, & Kinney, 2014; Yim et al., 2015).

De verminderde luchtkwaliteit door vliegverkeer wordt veroorzaakt door de uitstoot van fijnstof kleiner dan 2.5 micrometer (Engels: fine Particular Matter: $PM_{2.5}$) en vorming van ozon ($O_3$) gedurende alle vluchtfasen (landen, opstijgen en kruisvlucht), en resulteert naast zieken ook vroegtijdig overlijden (Brunelle-Yeung et al., 2014; Morita et al., 2014; Yim et al., 2015). De ingeschatte aantallen voor dit vroegtijdig overlijden lopen uiteen van 16000 ±50% (Yim et al., 2015) tot 410 ±55% (Morita et al., 2014) per jaar, wereldwijd. De grote verschillen in deze onderzoeksresultaten zijn deels te verklaren wanneer rekening gehouden wordt met de spreiding en onzekerheid van de resultaten en voor een andere deel door verschillen in de onderzoeksmethoden.

Het klimaat wordt door de luchtvaart beïnvloed doordat diens emissies de stralingabsorberende en stralingreflecterende eigenschappen van de atmosfeer veranderen. Voor 2005 was het vliegverkeer verantwoordelijk voor 3.5% van deze invloed op de atmosfeer ten opzichte van de totale antropogene invloed hierop (Lee et al., 2009).

Volgens Brasseur et al. (2016) en Kapadia et al. (2016) stoten vliegtuigmotoren de volgende stoffen uit die, hetzij als primair product, hetzij na secundaire reacties het klimaat beïnvloeden:

- Koolstofdioxide ($CO_2$)
- Stikstofverbindingen ($NO_x$)
- Koolstofwaterstoffen (HC)
- Koolstofmonoxide (CO)
- Zwaveloxiden ($SO_x$)
- Roet/Black Carbon (BC)
- Organische Koolstoffen (OC)
- Waterdamp ($H_2O$)

Het totaal van deze primaire stoffen en hun secundaire reactieproducten versterken het broeikaseffect van de atmosfeer, waarbij de bijdrage van de niet-$CO_2$ emissies groter is dan van de $CO_2$ emissie (Lee et al., 2009).

De momenteel gangbare vliegtuigbrandstof (conventionele kerosine) wordt vervaardigd uit ruwe olie. Aangezien dit een fossiele brandstof is, is hiervan de voorraad eindig. Liu, Yan, and Chen (2013) rapporteerden op basis van informatie van de International Energy Agency (IEA) dat de luchtvaart-sector in 2006 6.3% van de totale ruwe olieproductie verbruikte.

Deze negatieve effecten van de luchtvaart zullen de komende jaren verergeren (Schulz, 2018). Door toenemende welvaart en bevolking zal het mondiale vliegverkeer met gemiddeld 3.5% tot 4.4% per jaar toenemen voor de komende twee decennia, volgens voorspellingen van respectievelijk FAA (2018) en Schulz (2018). Dit komt neer op een verdubbeling over 15 jaar (Schulz, 2018).

Lee et al. (2010) en IPCC (1999) noemen verschillende routes om de luchtvaartgerelateerde emissie te laten afnemen:

a) Technologische aanpassingen aan vliegtuigen en motoren om brandstofverbruik en bepaalde emissies te reduceren.
b) Aanpassingen aan de vliegtuigbrandstoffen.
c) Operationele aanpassingen zoals efficiëntere vliegroutes, vliegtuigen niet in de "wacht zetten" tijdens aanvliegen en meer passagiers of vracht per vliegtuig vervoeren.
d) Politiek beleid en maatregelen zoals onder andere belasting innen op emissie of emissie handel.

In dit onderzoek richten wij ons op punt b), het aanpassen van de vliegtuigbrandstof. Hiertoe hebben we de impact van in gebruik name van de huidige bekende alternatieve kerosinesoorten onderzocht.

Liu et al. (2013) hebben 4 vliegtuigbrandstof-productietechnologieën voor conventionele en alternatieve kerosine beschreven en die als volgt gegroepeerd:

1. Raffineren (verhitten en destilleren) van conventionele ruwe olie.
2. Raffineren van onconventionele olie verkregen uit o.a. oliezanden en schaalolie.
3. Fischer-Tropsch (F-T) proces (gasificatie van de grondstof, verwijderen van ongewenste stoffen, omzetten van gas naar vloeistof via F-T synthese en raffineren/kraken) voor:
    - Coal(steenkool)-to-Liquid (CTL)
    - natural Gas-to-Liquid (GTL)
    - Biomass-to-Liquid (BTL)
4. Andere processen met als grondstof biomassa.

Patrick Schmidt, Batteiger, Roth, Weindorf, and Raksha (2018) voegen daar nog een 5$^{e}$, recente, technologie aan toe:

5. Het Power-to-Liquid (PTL) proces: (a) productie van $H_2$ door elektrolyse van $H_2O$ met elektriciteit, (b) synthese van H met $CO_2$/CO tot koolwaterstoffen, (c) omzetten koolwaterstoffen in gewenste eindproduct.

De technologieën onder 1. en 2. worden momenteel ingezet om conventionele kerosine te vervaardigen.

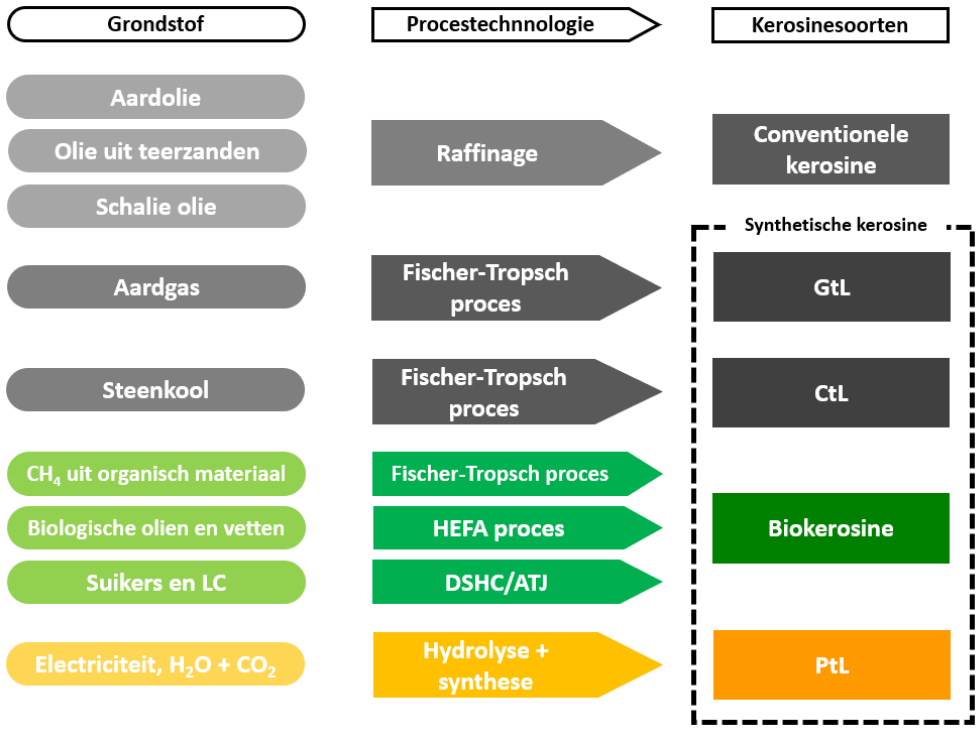
Volgens Liu et al. (2013) verzorgde het CTL-proces 92% van de vliegtuigbrandstof productie in Duitsland tijdens de tweede wereldoorlog en wordt nu 30% van de brandstof voor auto's in Zuid-Afrika vanuit dit proces geleverd.

Het GTL-proces wordt sinds 1993 commercieel ingezet door Shell in Maleisië voor olieproductie en in 2009 heeft er een commerciële civiele vlucht plaats gevonden met een mix van conventionele kerosine en GTL-brandstof (Liu et al., 2013). CTL en GTL zijn gebaseerd op dezelfde technologie. CTL, met steenkool als grondstof, komt steeds meer onder druk te staan vanwege de hoge $CO_2$-emissies bij het omzettingsproces zelf en bij de opwekking van de benodigde energie voor het omzettingsproces (Vallentin, 2008).

Het BTL-proces en de technologieën onder 4. zijn allen op biomassa gebaseerd. De kerosine die hieruit volgt, wordt daarom aangeduid als biokerosine (Liu et al., 2013). De American Society for Testing and Materials (ASTM) heeft (status maart 2017) voor biokerosine, naast het Fischer-Tropsch proces, Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA), het Alcohol-to-Jet (ATJ) en het Direct Sugars to Hydrocarbons (DSHC) proces gecertificeerd (Neuling & Kaltschmitt, 2018).

Het PTL-proces is nog niet volledig geïndustrialiseerd, maar is aan het einde van de ontwikkelingsfase .

De kerosinesoorten geproduceerd via technologieën onder punt 3 tot en met 5, worden in dit rapport (Lehmann, 2018)aangeduid als synthetische kerosine. Figuur 1 toont de kerosinesoorten die we hebben onderzocht met bijbehorende definities, grondstoffen en procestechnologieën.




*Figuur 1 Overzicht van grondstof en procestechnologieën van onderzochte kerosinesoorten.*

## 1.2. Het probleem

Er is onderzoek uitgevoerd naar effecten op milieu en klimaat door verbranding van de verschillende typen vliegtuigbrandstoffen. De onderzoeken richten zich op alleen bepaalde aspecten of op een deel van de kerosinesoorten. Zo gaan C. Zhang, Hui, Lin, and Sung (2016) in op de technische haalbaarheid van inzet van synthetische kerosine (exclusief PTL) en hun $CO_2$-uitstoot over de gehele levenscyclus. Staples, Malina, Suresh, Hileman, and Barrett (2018) hebben onderzoek gedaan naar de Life Cycle $CO_2$.-uitstoot van biokerosine.

Er ontbreekt nog een compleet overzicht waarin de resultaten van de recente onderzoeken zijn verzameld over 1) de emissies, 2) de fabricage- en implementatiekosten, 3) de vereiste aanpassingen van vliegtuigmotoren en van de infrastructuur van vliegvelden, 4) de gevolgen voor (agrarisch) landgebruik en voedselproductie (door benodigde grondstof) en 5) de beschikbaarheid naar volume en tijd van alle synthetische kerosinesoorten ten opzichte van conventionele kerosine.

De beschikbaarheid van zo’n compleet overzicht kan het maken van verantwoorde keuzes voor de toekomstige invulling van de brandstofvoorziening van het vliegverkeer in belangrijke mate ondersteunen.

## 1.3. Vraagstelling

De onderzoeksvraag die gehanteerd is om de data ten behoeve van een overzicht, zoals omschreven in de vorige paragraaf, te extraheren vanuit bestaand wetenschappelijke onderzoek luidt als volgt:

***Wat zijn de milieu-, klimaat-, financiële, infrastructurele en technologische gevolgen van het gebruik van synthetische kerosine als vliegtuigbrandstof?***

Deze onderzoeksvraag is in de volgende deelonderzoeksvragen gesplitst:

1. Welke toxische stoffen worden door verbranding van conventionele kerosine uitgestoten of gevormd en volgens welk proces verloopt dat?
2. Voor elke kerosinesoort (synthetisch en conventioneel): Wat is de massa (kg/kg brandstof) van de emissie van toxische stoffen?
3. Voor elke kerosinesoort (synthetisch en conventioneel): Wat is de massa van de Life Cycle emissie van broeikasgassen per kg kerosine (kg/kg) en per energie-inhoud (kg/MJ) van de kerosine?
4. Voor elke kerosinesoort (synthetisch en conventioneel): Wat zijn de kosten van de kerosine "aan de pomp" in EUR/kg brandstof?
5. Voor elke kerosinesoort (synthetisch en conventioneel): Wat zijn de gevolgen bij ingebruikname
    a) voor de vliegtuig(motor)en?
    b) voor de infrastructuur van vliegvelden?
    c) voor het (agrarisch) landgebruik?
    d) voor water gebruik?
    e) voor de voedselproductie?
6. Voor elk type synthetische kerosine: Wat is de realistisch haalbare hoeveelheid en het realistisch haalbare tijdstip van invoering als vliegtuigbrandstof?

## 1.4. Doelstelling

De opdrachtgever, het Beraad Vlieghinder Moet Minder (BVM2) zet zich in om alle negatieve effecten als gevolg van vliegverkeer rondom Vliegveld Eindhoven te verminderen door kennis hierover te vergaren en daarmee te lobbyen bij invloedrijke partijen. Dit onderzoeksproject heeft als doel BVM2 te ondersteunen met het gefundeerd opstellen van haalbare eisen ten aanzien van vermindering van de negatieve effecten als gevolg van verbranding van conventionele kerosine. Ten behoeve hiervan beoogt dit adviesrapport een overzicht te geven van de mogelijkheden en effecten van in gebruik nemen van alle nu bekende alternatieve vliegtuigbrandstoffen op gebied van:

- Emissies
- Kosten
- Aanpassingen noodzakelijk op vliegtuig en vliegveld niveau
- De haalbare schaal van implementatie

## 1.5. Kenmerken (criteria) resultaten

Dit adviesrapport geeft aanbevelingen over welk kerosinesoort het best ingezet kan worden om de negatieve gevolgen van conventionele kerosine te verminderen, toepasbaar op de civiele luchtvaart uitgerust met straalmotoren.

## 1.6. Randvoorwaarden en afbakening

De data zijn geldig voor de subsone civiele luchtvaart uitgerust met straalmotoren.

# 2. Methode: onderzoeksopzet

## 2.1. Onderzoeksopzet

Het onderzoek is opgesplitst in 4 deelonderzoeken, ingedeeld naar 3 synthetische kerosinesoorten (GTL/CTL-kerosine, biokerosine en PTL-kerosine) en naar conventionele kerosine (als referentie).

In elk deelonderzoek zijn de verschillende deelonderzoeksvragen (zie §1.3) beantwoord voor de betreffende kerosinesoort, waarbij deelvraag 1 uitsluitend op conventionele kerosine betrekking heeft en de deelvragen 5 en 6 niet van toepassing zijn op conventionele kerosine. Elk deelonderzoek genereert zijn eigen rapportage. De 4 deelrapportages zijn vervolgens in onderlinge samenhang en volgens een uniforme structuur opgesteld en tenslotte geïntegreerd tot dit adviesrapport.

## 2.2. Onderzoeksmethode

Vanwege het exploratieve karakter van de vraagstelling is gekozen voor literatuuronderzoek als onderzoeksmethode.

De gebruikte literatuur is verdeeld over twee categorieën:

1. 'Grijze' literatuur, geschreven door instellingen die beleidsmatig relevant zijn maar niet zelf deel uitmaken van het formele wetenschappelijke proces.
2. Wetenschappelijke literatuur.

De eerste categorie is vooral bij biokerosine en PTL-kerosine sterk vertegenwoordigd (naast wetenschappelijke publicaties). Er is in die betreffende deelonderzoeken naar gestreefd om de literatuurstudies te baseren op een representatieve afspiegeling van de literatuur in beide categorieën.

Voor de onderbouwing van de probleemanalyse (H1) heeft BVM2 al een eerste aanzet tot een literatuur database (vooral 'grijze' literatuur) opgebouwd. Voor een verdere onderbouwing is door de project-teamleden intuïtief en systematisch naar (recente) wetenschappelijke publicaties gezocht. Met genoemde aanzet en de verder gevonden publicaties is de basis gelegd voor een literatuurdatabase.

### 2.2.1. 'Grijze' literatuur

'Grijze' publicaties komen uit drie typen bronnen:

1. De overheden op diverse schaalniveaus
2. Kennisinstituten op diverse schaalniveaus
3. Het bedrijfsleven, dat ook weer op diverse schaalniveaus georganiseerd is

Bij 'grijze' literatuur bestaat er geen geordend archiveringssysteem. Evenmin bestaat er een algemeen geaccepteerde methode om de kwaliteit van documenten te beoordelen.
Desalniettemin is deze literatuur van groot belang voor met name de relatief nieuwe brandstoffen biokerosine en PTL-kerosine, die nog volop in ontwikkeling zijn en waarvan, met het oog op de verduurzaming van de luchtvaart, ook het meeste effect is te verwachten. Ze zijn daarom zeer actueel.

De internationale overeenkomsten, stimuleringsprogramma's en inperkende regelgeving (zoals bijv. RED (Renewable Energy Directive), RED II en de Fuel Quality richtlijn van de EU), de zelfregulerings-afspraken binnen de luchtvaartsector en de nationale initiatieven en wetgeving dicteren de praktijk.

Gezocht is in onder andere:

- Publicaties van de EU
- Nederlandse politieke documenten
- De archieven van CE Delft
- Normatieve afspraken binnen regulerende organen zoals de Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB) en de Sustainable Aviation Fuel Users Group (SAFUG)

Zie voor selectiecriteria en verdere details de betreffende deelonderzoekrapportages.

### 2.2.2. Systematisch literatuuronderzoek

Per deelonderzoek is met behulp van een systematisch literatuuronderzoek (Systematic Literature Review/SLR) de wetenschappelijke ('witte') literatuur geselecteerd die gebruikt is om de afzonderlijke deelonderzoeksvragen te beantwoorden. Systematisch literatuuronderzoek heeft hier de voorkeur boven intuïtief zoeken omdat dan de kans groter is dat meer relevante literatuur wordt gevonden (Boland, Cherry, & Dickson, 2017).

Het SLR is per deelonderzoek globaal opgebouwd uit de volgende 3 stappen:

1. Opstellen van zoekcriteria voor de selectie van relevante publicaties binnen de verschillende deelonderzoeken.

   Gezien de snelle ontwikkelingen op het gebied van synthetische kerosine, is naar recente literatuur gezocht (maximaal 5-10 jaar oud, afhankelijk van kerosinesoort en specifieke deelvraag), teneinde een maximale actualiteit in de onderzoeksresultaten te bewerkstelligen. Er is gezocht in databases van onder andere ScienceDirect, Research Gate, Web of Science en SpringerLink, al of niet via de digitale bibliotheek van de OU. Hierbij zijn per deelonderzoek en per deelvraag specifieke zoektermen gebruikt. Zie hiervoor de betreffende deelrapportages.

2. Selectie van relevante publicaties per deelonderzoek.

   De op basis van de zoekcriteria gevonden artikelen zijn op titel en abstract geselecteerd op relevantie. De relevante artikelen zijn vastgelegd in een database per deelonderzoek. Zie voor de details hiervan de afzonderlijke rapportages.

3. Evaluatie op randvoorwaarden van studies/data per deelonderzoek.

   Na evaluatie op wetenschappelijke kwaliteitscriteria (onder andere foutmarges, correlaties, eventuele 'bias', significantie en eventuele replicatie), afbakening (zie 1.6) en aanvullende randvoorwaarden (die per deelonderzoek kunnen verschillen, zie daarvoor de betreffende rapportages), zijn de deelonderzoek databases qua relevantie verder aangescherpt.

### 2.2.3. Data-analyse

De relevante data uit de geselecteerde literatuur (zowel 'grijs' als wetenschappelijk) zijn samengevat en in een verzamelbestand gezet dat is opgesplitst naar deelonderzoek, met daarin per publicatie voor alle deelvragen een invulveld. Op deze manier zijn ook deelonderzoek-overlappende en -overstijgende publicaties meegenomen in het onderzoek. Bijlage A bevat dit verzamelbestand met samenvattingen en is als los supplement toegevoegd. Met behulp van deze gestroomlijnde data-analyse zijn vervolgens de verschillende deelvragen beantwoord.

# 3. Kenmerken en productiewijzen van kerosine

## 3.1. Kerosine als eindproduct

Kerosine (synoniem jet fuel) is een ingewikkeld mengsel van zeer veel verschillende koolwaterstoffen ten behoeve van gebruik in straalmotoren.

Deze straalmotoren moeten in verschillende omstandigheden feilloos functioneren, waaronder de temperaturen van rond de -40°C op kruishoogtes van 10 tot 12 km. Dat leidt tot strenge technische voorschriften aan de motoren en aan de brandstof.
De Aviation Fuels Technical Review van Chevron (Hemighaus et al., 2006) benoemt een dozijn gebruikseisen. De verschillende soorten kerosine onderscheiden zich het meest van elkaar op:

- De energie-inhoud per kg
- De viscositeit, ook bij zeer lage temperaturen, en het vriespunt
- De vluchtigheid, en daarmee het vlampunt
- Het smerend vermogen en de interactie met kunststof (t.b.v. bijv. de brandstofpompen)

De eisen worden vastgelegd door de American Society for Testing and Materials (ASTM).
Voor de gangbare soorten Jet A en Jet A-1 worden die vastgelegd in richtlijn D1655 (Groot-Brittannië en Rusland hebben hun eigen standaardisatie-instituten, maar die standaarden worden wereldwijd veel minder gebruikt, wijken nauwelijks af van de ASTM-standaard en hebben daarom voor deze studie geen meerwaarde).
Jet A wordt gebruikt door civiele vliegtuigen die in de VS tanken, Jet A-1 wordt gebruikt door civiele vliegtuigen die elders ter wereld tanken.
De defensie van de VS heeft zijn eigen standaardisatie. Voor de luchtmacht leidt dat tot JP8-kerosine.
Er bestaan kerosine-specificaties voor specifieke omstandigheden, die hier buiten beschouwing blijven.

Kerosine heeft een bulk-samenstelling. Daarnaast zitten er microbestanddelen in. De gebruikseisen leggen aan de bestanddelen fysische en chemische beperkingen op.

De bulksamenstelling is:

- Alkanen met een aantal C-atomen van 8 t/m 16. Daarvan moet een deel vertakt zijn ("iso-") om het vriespunt te verlagen (bijv. n-octaan of 2-methylheptaan = iso-octaan)
- Cyclo-alkanen (verzadigde ringvormige koolwaterstoffen)
- Alkenen (ook genaamd olefinen)
- Aromaten (vooral benzeen en naftaleen). Samen moeten die tussen de ruim 8% en 25% (volume) van het mengsel uitmaken, waarbij naftaleen alleen onder de 3% (volume) moet blijven.

Deze bulksamenstelling moet totaliter:

- een dichtheid hebben tussen de 775 en 840 kg/m$^3$
- een energie-inhoud van minstens 42.8 MJ/kg
- een vriespunt van -40; -47; -47°C voor resp. Jet A; Jet A-1 en JP8
- een vlampunt van > 38°C

Voor deze studie is het enige belangrijke micro-element zwavel. Dat mag in kerosine aanwezig zijn in concentraties tussen de 0.0 en 0.3% (massa). Zwavel kan in kerosine geheel gemist worden.

## 3.2. Herkomst van kerosine

In deze studie wordt aandacht besteed aan kerosine uit vijf typen bronnen:

- ruwe olie
- methaan (aardgas of biogas, Gas-to-Liquid, GTL)
- steenkool (Coal-to-Liquid, CTL)
- $CO_2$ uit de atmosfeer of $CO_2$ of CO uit industriële inrichtingen (Power-to-Liquid, PTL of electrofuels)
- biomassa (diverse procédés waarvan de FT-techniek BTL er één is, biokerosine)

De eerste route wordt in deze studie met "conventioneel" aangeduid, de vier andere met de verzamelnaam "synthetisch".

## 3.3. Ruwe olie als grondstof

Praktisch alle kerosine wordt momenteel uit ruwe olie vervaardigd. Over 2018 bedraagt dat mondiaal een energetische waarde van ca 9500PJ. (ICAO_Environment_branch, 2016)
De huidige omvang van alternatieve vliegtuigbrandstoffen is verhoudingsgewijs nog zeer gering. In 2020 zal dat mondiaal ergens in de orde van grootte van 10PJ zijn (met een zeer ruime marge) (Mawhood, Gazis, De Jong, Hoefnagels, & Slade, 2016).

Ruwe olie is een uiterst complex mengsel.
De bulk van het mengsel bestaat uit koolwaterstoffen met tussen de 5 en de 40 koolstofatomen. De algemene chemische vorm, waarin deze koolstofverbindingen onderverdeeld kunnen worden, is te vinden in Tabel 1.
Daarnaast bevat ruwe olie veel (micro)bijmengingen. Deze zijn, geordend naar hun gewichts-percentage als element, te vinden in Tabel 2 (Speight, 2001).

*Tabel 1. Samenstelling van ruwe olie naar klassen koolwaterstoffen, op gewichts% (Hyne, 2012).*

| | Gewichts% | range in gewichts% |
|---|---|---|
| Alkanen (paraffinen) | 30 | 15-60 |
| Cycloalkanen (naftenen) | 49 | 30-60 |
| Aromaten | 15 | 3-30 |
| Asfaltachtige stoffen | 6 | de rest |

*Tabel 2. Samenstelling van ruwe olie naar element, op gewichtspercentage (Speight, 2001).*

| | Min% | Max% |
|---|---|---|
| Koolstof | 83.0 | 87.0 |
| Waterstof | 10.0 | 14.0 |
| Stikstof | 0.1 | 2.0 |
| Zuurstof | 0.05 | 1.5 |
| Zwavel | 0.05 | 6.0 |
| Metalen | | <1000 ppm (Nikkel en Vanadium) |

Om van ruwe olie kerosine te maken moeten er in hoofdlijnen drie zaken gebeuren (Liu et al., 2013; Speight, 2001):

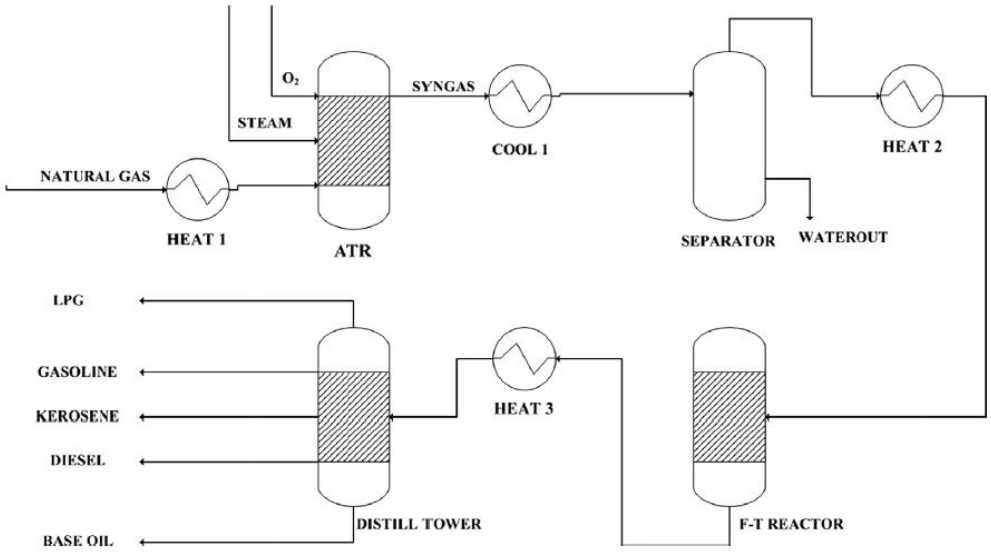
- de koolwaterstofmoleculen moeten gescheiden worden naar hun vluchtigheid, die onder andere afhangt van het aantal koolstofatomen. Dat kan door te selecteren op hun kookpunt. Het kookpunt van het middensegment, bestemd als de toekomstige kerosinefractie, ligt op 175 - 260°C.
- de meeste bijmengsels moeten verwijderd of teruggedrongen worden, waarbij met zwavel soepel omgegaan wordt.
- het zo ontstane vloeistofmengsel moet meestal worden nabewerkt (bijvoorbeeld ge-isomeriseerd) om aan de extra strenge eisen te voldoen die aan kerosine worden gesteld, bijvoorbeeld vanwege de zeer lage temperaturen op grote hoogte.

Kerosine is verwant met, maar niet identiek aan dieselbrandstof voor auto's. Kerosine en diesel komen uit dezelfde destilleerkolom, maar diesel heeft wat langere koolstofketens en vraagt, omdat voertuigdiesel meestal in minder extreme omstandigheden gebruikt wordt, om minder nabewerking na de destillatie.
In de afwegingen die een raffinaderij maakt, is daarom diesel een financieel aantrekkelijker product dan kerosine.

De techniek om aardolie te raffineren is niet het hoofdonderwerp van deze studie. Daarom beperkt de studie zich tot bovenstaande hoofdzaken van het raffinageproces.

## 3.4. Fischer-Tropsch procédé, GTL en CTL

Het proces als geheel, waarvan de Fischer-Tropsch synthese de kern is, kan elk koolstofrijk substraat als vertrekpunt gebruiken om brandstoffen te maken met een gewenste range aan specificaties. Omdat dit proces bij elke route naar synthetische kerosine een rol kan spelen, wordt het proces hier apart behandeld. Voor een schema zie Figuur 2.




The basic flow sheet of F–T based GTL technology.

*Figuur 2. Stroomschema t.b.v. productie van Gas-to-Liquid-brandstof (Liu et al., 2013).*

Het gehele proces bestaat uit vier stappen: (Liu et al., 2013)

1) de productie van een synthetisch gas ('syngas'), bestaande uit CO en $H_2$, uit organisch materiaal.
2) verwijdering van ongewenste verbindingen (zoals $CO_2$ en $SO_2$).
3) de eigenlijke Fischer-Tropsch synthese, waarin het syngas wordt omgezet in een mengsel van voornamelijk rechte koolwaterstofketens van zeer uiteenlopende lengte, van methaan met één C-atoom tot was met meer dan 20 C-atomen.
4) verdere processen (inclusief kraken en raffineren, zoals bij kerosine uit ruwe olie) en upgrading naar vloeibare brandstoffen.

In dit schema is de eerste stap specifiek voor de betreffende bron. Op het moment dat het syngas ontstaan is, is als het ware de herinnering aan de bron verdwenen. Vanaf dat moment is het proces universeel.

De GTL-route is met het bovenstaande adequaat beschreven.

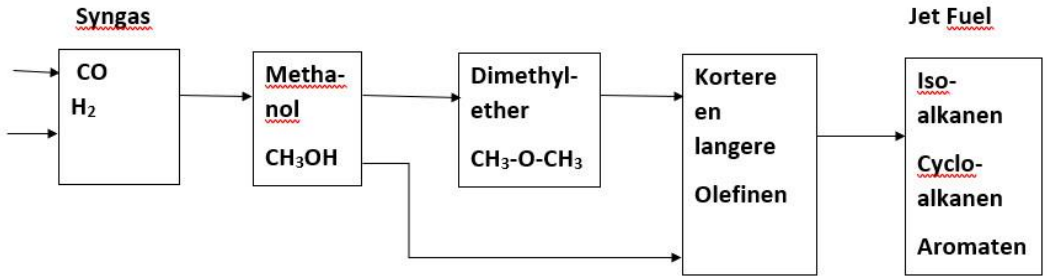
Als de installatie gevoed wordt met steenkool in plaats van aardgas, en als er een voorziening wordt ingebouwd om vanuit de eenheid 'ATR' afval af te voeren (zoals teer en fenolen), staat er een stroomschema van een CTL-installatie.

## 3.5. PTL of electrofuels

Bij PTL wordt geëxperimenteerd (grootschalige productiecapaciteit ontbreekt nog) met twee procédés.

Bij het ene procédé wordt $CO_2$ uit de atmosfeer of uit de schoorsteen van een industriële inrichting opgevangen, en via een 'inverse CO-shift' omgezet in CO en zuurstof ( $2CO_2 \rightarrow 2CO + O_2$ ).
Tegelijk wordt via electrolyse water gesplitst in waterstof en zuurstof (een techniek die steeds meer in de belangstelling staat om overschotten aan duurzame elektriciteit nuttig te gebruiken).
Een variant is dat de CO rechtstreeks uit de schoorsteen van een industriële inrichting wordt weggevangen (bijvoorbeeld bij een hoogoven).
In beide gevallen ontstaat na het samenbrengen van CO en $H_2$ syngas. Vanaf dat moment is het stroomschema van Figuur 2 van toepassing.

In het andere procédé wordt uit waterstof en $CO_2$, via syngas, methanol geproduceerd. Dit wordt door dehydratering via ether omgezet in lichte alkenen en die oligomeriseren verder. Zie Figuur 3. Het oudste proces van ExxonMobil produceert alleen benzine, maar een later proces produceert ook destillaten waaruit kerosine bereid kan worden (Patrick Schmidt et al., 2018).




*Figuur 3. Vanuit Syngas via methanolprocédé naar vloeibare brandstof (ExxonMobil; Patrick Schmidt et al., 2018).*

Beide processen kunnen als duurzaam bestempeld worden als de ervoor nodige elektriciteit duurzaam wordt opgewekt.
Als $CO_2$ zich al gemengd heeft met de atmosfeer, valt de herkomst niet te achterhalen. Processen die $CO_2$ uit de atmosfeer halen, worden in deze studie als duurzaam gezien.
Als CO en $CO_2$ opgevangen worden uit de schoorsteen van een industriële inrichting waarvan de productie van deze gassen niet het bedrijfsdoel is, wordt de verwerking van de gassen duurzaam genoemd ongeacht de duurzaamheid van het bedrijfsproces zelf.

CO en $CO_2$ uit de schoorsteen van Tata Steel (een voorbeeld dat inmiddels doorgerekend is) zijn het resultaat van een niet-duurzame wijze van staal bereiden. De duurzaamheid van de staalbereiding is echter geen onderwerp van deze studie.
Een PTL-proces om deze gassen opnieuw in brandstof om te zetten wordt in deze studie desalniettemin als duurzaam beschouwd. En ongeacht dit definitievraagstuk, is het verstandig om met dergelijke geconcentreerde bronnen te beginnen.

## 3.6. Biokerosine

Er bestaan verschillende technieken om van biomassa biokerosine te maken.

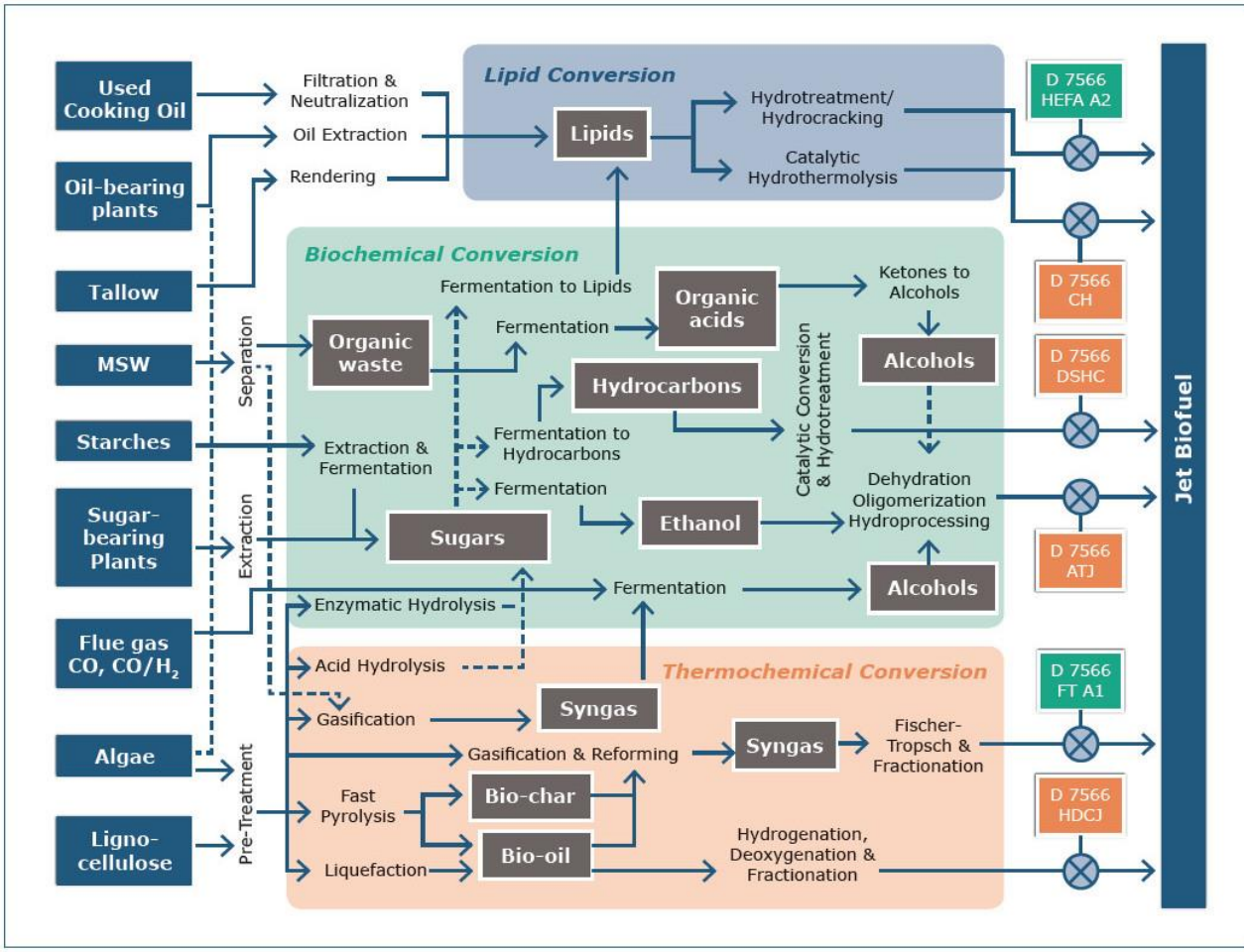
Een van de mogelijkheden is om biomassa sterk te verhitten in afwezigheid van zuurstof (pyrolyse), waarna de aldus ontstane gassen (met een of twee C-atomen), samen met stoom, in het stroomschema van Figuur 2 ingevoerd worden. In analogie met CTL en GTL heet dit dan BTL. (Liu et al., 2013) .

Een totaaloverzicht van alle productieprocédés is te vinden in Figuur 4.

Naast het FT-procédé (in de figuur onderdeel van de thermochemische procédés) bestaan procédés die afgewerkte oliën en vetten omzetten (het blok 'lipid conversion'), en procédés die suikers (al dan niet gepolymeriseerd tot zetmeel of cellulose en verwante materialen) omzetten (het blok 'biochemical conversion').

De meest voorkomende route in het blok Lipid Conversion is het HEFA-procédé (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids). De aanduiding HRJ (Hydroprocessed Renewable Jet Fuel) wordt vaak als synoniem gebruikt. Dit is niet geheel correct. De aanduiding HEFA slaat op het procédé, de aanduiding HRJ op het eindproduct van het procédé.
Bij de verwerking van oliën en vetten (allen esters van de driewaardige alcohol glycerol en vetzuren) wordt de esterbinding verbroken. Onder toevoer van waterstof worden de zuurstofatomen van de vetzuren afgehaald en worden eventuele dubbele bindingen verzadigd. Zodoende eindigen de vetzuren als koolwaterstofmoleculen ter lengte van die van het oorspronkelijke vetzuur, en eindigt het glycerol als glycerol of als propaan (beide bruikbare bijproducten) (Wang & Tao, 2016).
De zo ontstane koolstofketens hebben in praktijk vaak een lengte die kenmerkend is voor dieselolie (rond de C18). Omdat kerosine kortere koolstofketenlengtes heeft dan diesel, is een extra kraakproces nodig. Het HEFA-proces werkt daarom voor diesel efficiënter dan voor kerosine (Zech, Dietrich, Reichmuth, Weindorf, & Müller-Langer, 2018).

Als de gebruikte oliën en vetten afval zijn, of als ze afkomstig zijn van biomassa, geteeld op grond die anders niet gebruikt wordt en op een wijze die geen zwaar beroep doet op natuurlijke hulpbronnen, en als de externe waterstof duurzaam geproduceerd is, kan het HEFA-procédé als duurzaam bestempeld worden.
Dit HEFA-procédé is technisch uitontwikkeld, heeft ASTM-goedkeuring, is commercieel beschikbaar en voorziet momenteel in het overgrote deel van de synthetische kerosine (Mawhood et al., 2016).




*[Betekenis van de afkortingen: HEFA – Hydroprocessed Esters and Fatty Acids; CH – Catalytic Hydrothermolysis; DSHC – Direct fermentation of Sugars to Hydrocarbons; ATJ – Alcohol To Jet; FT – Fischer-Tropsch hydroprocessed synthetisized paraffinic kerosene; HDCJ – Hydrotreated Depolymerized Cellulosic to Jet]*

*Figuur 4. Overzicht van de belangrijkste procédés om uit biomassa kerosine te maken (Cortez, 2013).*

Het biochemische blok omvat een groot aantal procédés, zowel met als zonder alcohol als tussenstap. Daarvan is de Alcohol To Jet (ATJ) momenteel de belangrijkste. Het procédé via ethanol wordt hier als voorbeeld behandeld (Wang & Tao, 2016).
Suikers (in vrije vorm of, na hydrolyse, vanuit de gepolymeriseerde vormen als cellulose en zetmeel) worden door fermentatie in ethanol omgezet. Op de ethanol worden vier bewerkingen uitgevoerd:

1. Aan een ethanolmolecuul wordt water onttrokken (dehydratie). Daardoor ontstaat etheen.
2. Men laat deze etheen oligomeriseren. Hierdoor ontstaan koolstofketens van diverse lengten en minstens één dubbele binding.
3. Resterende dubbele verbindingen worden met extern aangevoerde waterstof verzadigd gemaakt
4. Verdere processen (inclusief kraken en raffineren, zoals bij kerosine uit ruwe olie) en upgrading naar vloeibare brandstoffen.

Als de bron van suikers c.q. zetmeel of cellulose duurzaam is (zie hoofdstuk 4.5), en als de extern aangevoerde waterstof duurzaam vervaardigd is, kan dit proces als duurzaam bestempeld worden. ATJ heeft ASTM-goedkeuring, maar verkeert nog in een pilotstadium.

# 4. Resultaten

## 4.1. Toxische emissies

### 4.1.1. Inleiding

In de inleiding is uiteengezet, wat de maatschappelijke belangen zijn rondom de groei van de luchtvaart. Naast voordelen zijn er ook belangrijke nadelen. Voor wat deze studie aangaat, betreffen die vooral de gevolgen van lozingen door de luchtvaart

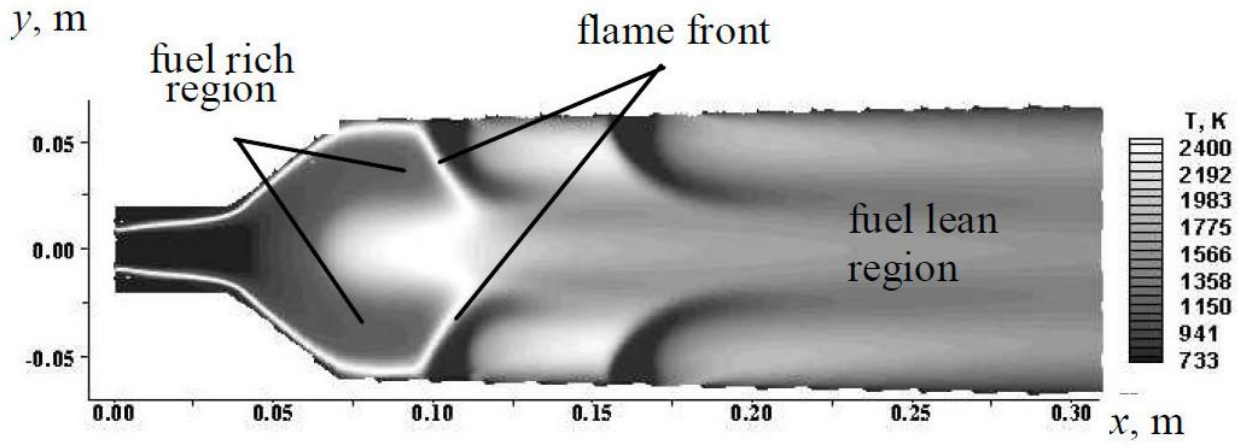
- voor de luchtkwaliteit op diverse schaalgroottes (van regionaal tot mondiaal),
- voor het klimaat, zowel via het gangbare $CO_{2,eq}$ – mechanisme als via de interacties tussen uitlaatgassen en delen van de atmosfeer op grote hoogte, zoals de ozonlaag.

Het gaat om de gevolgen van de immissies in het atmosferische systeem. Deze immissies en hun gevolgen worden kort benoemd om het vraagstuk in te kaderen, maar zijn niet in eigen recht onderwerp van deze studie.

De onderzoeksvragen gaan over de emissies uit het systeem-straalmotor. Daar kan handelend worden opgetreden, onder meer door een andere brandstofkeuze, zoals de onderzoeksvraag luidt.
In h. 4.1. worden de emissies beschouwd die vooral voor de luchtkwaliteit van belang zijn. Daartoe wordt eerst geschetst hoe de chemische en fysische reactieprocessen in een straalmotor er uit zien.

### 4.1.2. Reacties van conventionele kerosine in een straalmotor

Binnen de verbrandingskamer heersen verschillende regimes. Zie Figuur 5.



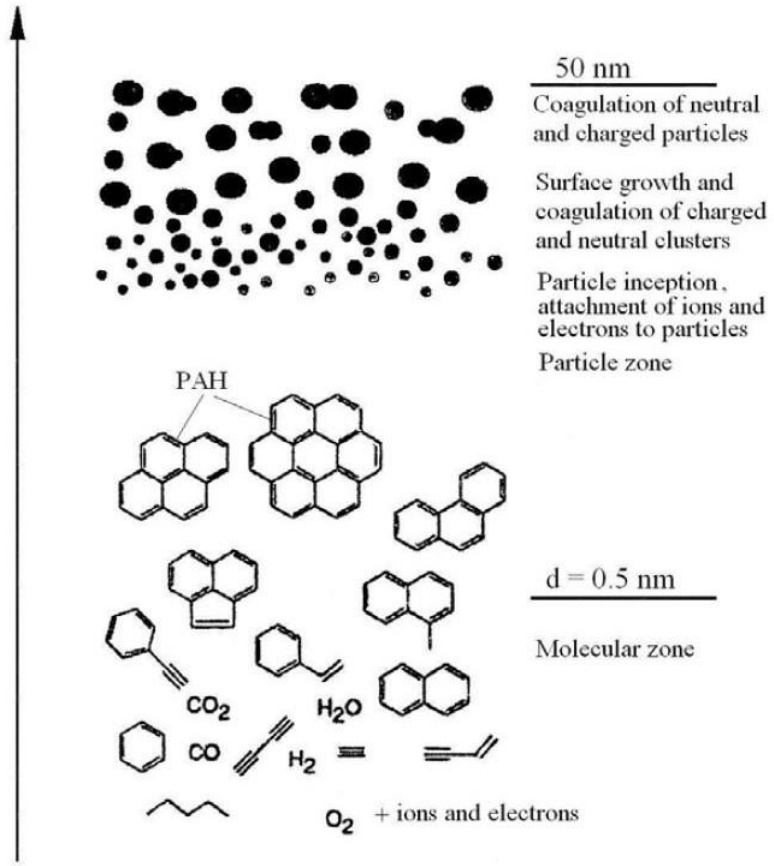

*Figuur 5. Een verbrandingskamer met de daarin heersende temperaturen. De tekening is gemodelleerd naar de PS 90-A straalmotor, die onder andere in Iljoesjin-verkeersvliegtuigen zit (Starik, 2007).*

Waar de temperatuur het hoogst is, is de brandstof t.o.v. de lucht in lichte overmaat aanwezig (Braun-Unkhoff, Riedel, & Wahl, 2016). De heersende temperatuur is zo hoog, dat het gasmengsel trekken van een plasma krijgt. Een deel van de moleculen splitst in atomen, chemische radicalen, ionen en elektronen. Daardoor is, met name in het gebied met de hoogste temperaturen, een grote verscheidenheid aan chemische (deel)reacties mogelijk. Daaronder ook endotherme reacties zoals de

vorming van NO en $NO_2$ uit atmosferische $N_2$ en $O_2$. De verblijfstijd in de verbrandingskamer is ongeveer 15ms. In zeer korte tijd gaat het gasmengsel van een zeer hoge naar een veel minder hoge temperatuur. Het systeem verkeert dus in extreem niet-evenwicht (Starik, 2007). Een volledige verbranding is niet mogelijk.

Producten van volledige verbranding zijn $CO_2$. $H_2O$, $SO_2$ en $SO_3$ (de laatste twee als zwavel in de kerosine als bijmengsel aanwezig is).
Producten van onvolledige verbranding in de gasvorm zijn CO en $C_xH_y$ (onverbrande koolwaterstoffen), en deels geoxideerde koolwaterstoffen in met name de aldehyde-vorm (Braun-Unkhoff et al., 2016).

De roetvorming begint in het hete gebied waar brandstof in lichte overmaat aanwezig is, uit precursor-moleculen die zich daartoe lenen. Dat betreft vooral aromatische verbindingen. Moleculen met één aromatische ring (benzeen) en twee aromatische ringen (naftaleen) koppelen tot Poly Aromatische Koolwaterstoffen (PAK's), die doorgroeien tot roetdeeltjes bij het verlaten van de uitlaat. Zie Figuur 6.




*Figuur 6. Vorming van roetdeeltjes in de verbrandingskamer (Starik, 2007).*

Tijdens en na de tocht door de verbrandingskamer vormen zich uit het uitstromende materiaal, naast roetdeeltjes, ook andere grotere aggregaten. De lading op sommige roetdeeltjes kan de dipool-moleculen van bijvoorbeeld water aantrekken en daardoor worden ze hydrofiel (neutrale roetdeeltjes zijn hydrofoob) (Starik, 2007).

Het kan bij die grotere aggregaten gaan om:

- kleine druppeltjes zwavelzuur ($SO_3$ dat water om zich heen verzameld heeft).
- secundaire sulfaten, zoals die kunnen ontstaan door reactie met in de atmosferische achtergrond aanwezige ammoniak.
- Secundaire nitraten, o.a. door reactie met in de atmosferische achtergrond aanwezige ammoniak.
- "Organic Carbon" (OC), waarin zich half- en onverbrande koolwaterstoffen verzameld hebben (o.a. aldehyden zoals formaldehyde). Dit type aggregaten noemt men vluchtige aerosolen.
- Black Carbon (BC) of non-volatile Particulate Matter (er bestaan meerdere namen die min of meer als synoniem gebruikt worden).
- combinaties, zoals een roetkern waarom heen zich een laagje vloeistof heeft afgezet met bovengenoemde bestanddelen.

## 4.1.3. Macroscopische determinanten

De volgende macroscopische determinanten hebben een significante invloed op de volgende vormingsprocessen (Braun-Unkhoff et al., 2016):

- het volume van de verbruikte brandstof heeft evenredig invloed op alle verbrandingsproducten, en daarmee op $CO_2$ en $H_2O$.
- boven op (a) bepaalt de H/C-verhouding in de brandstof de geproduceerde hoeveelheid $H_2O$.
- boven op (a) bepaalt het zwavelgehalte de geproduceerde hoeveelheid zwaveloxiden. Het zwavelgehalte mag 3000ppm (gewicht) zijn, maar is in praktijk meestal 400-800ppm bij conventionele kerosine (Khalek, 2016; Moore et al., 2017).
- boven op (a) verhogen het aromaten- en zwavelgehalte de geproduceerde hoeveelheid roet. Het aromaatgehalte moet bij conventionele kerosine tussen de 8 en de 25 gewichtsprocent liggen, maar ligt meestal tussen de 10 en 20% (Khalek, 2016; Moore et al., 2017).
- de motorbelasting. Deze wordt uitgedrukt als percentage van vol vermogen. Idle is 0%, taxiën is 7%, landen 30%, opstijgen is 100% (vol vermogen) en daarna klimmen is 85%. Idle en taxiën verhogen relatief de geproduceerde CO en onverbrande koolwaterstoffen, opstijgen en klimmen verhogen de NO, $NO_2$ en roetvorming.
- de verbrandingsomstandigheden in de motor (druk, temperatuur, turbulentie en verblijftijd in de motor) hebben via de ligging van chemische evenwichten en de menging van brandstof en zuurstof invloed op de onverbrande koolwaterstoffen, CO, NO, $NO_2$.

## 4.1.4. Milieugevolgen conventionele en alternatieve kerosine

Voorgaande opsomming maakt het mogelijk de onderzoeksvraag te beantwoorden naar de emissies en de bijbehorende milieugevolgen van het gebruik van conventionele en synthetische kerosine.

**Zwavel**

Zwavel-aerosolen, waaronder druppeltjes zwavelzuur en eventuele secundaire zwavelverbindingen, maken deel uit van het UltraFijn Stof (UFS), deeltjes met een diameter < 100nm. Fijn stof, en waarschijnlijk ook UFS, hebben een negatieve werking op de volksgezondheid .(Gezondheidsraad, 2018)

Daarnaast hebben zwavelhoudende aerosolen een complex effect op het klimaat (Brasseur et al., 2016).

Conventionele kerosine bracht (op elementbasis berekend) in 2006 ruim 2 Mton zwavel in de atmosfeer. Bij ongewijzigd beleid zal dat in 2050 ongeveer drie maal zoveel zijn (Brasseur et al., 2016).

Synthetische kerosine volgens het HEFA-proces, het Fischer-Tropsch-proces (FT-proces) en het Alcohol to Jet-proces (ATJ-proces) bevat nauwelijks of geen zwavel. Hetzij omdat er in het uitgangsmateriaal weinig of geen zwavel zit, hetzij omdat het FT-proces vereist dat alle zwavel er in het syngas-stadium uit gezuiverd wordt. Dit vertaalt zich in navenant lagere zwavelhoudende emissies (Beyersdorf et al., 2014; Braun-Unkhoff et al., 2016; Liu et al., 2013; Moore et al., 2017; Yang, Xin, He, Corscadden, & Niu, 2018).
In praktijk zijn de voordelen slechts beperkt haalbaar, omdat synthetische kerosine slechts tot hooguit 50% mag worden bijgemengd met conventionele kerosine (Hemighaus et al., 2006).

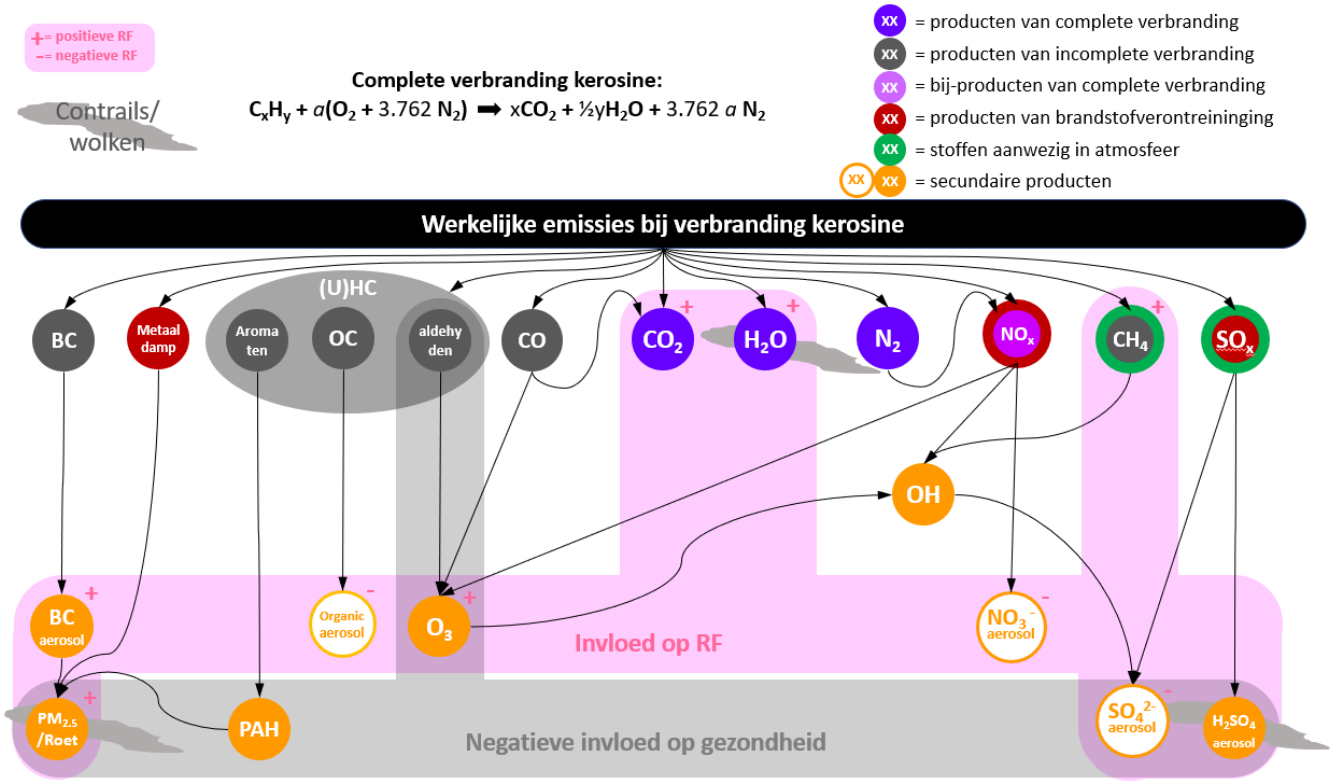
**Roet (BC) en Organic Carbon (OC)**
Roet en OC maken deel uit van het UFS en hebben daarom een negatieve werking op de volksgezondheid (Gezondheidsraad, 2018). Daarnaast versterkt roet de opwarming van de atmosfeer, direct vanwege de absorbtie van zonnestraling en indirect, omdat roetdeeltjes die door aanhangend OC- en zwavelhoudend materiaal hydrofiel geworden zijn, als condensatiekernen voor ijskristallen werken waaruit contrails (Brasseur et al., 2016).
OC bevat onvolledig verbrande koolwaterstoffen, waaronder aldehydes (Li et al., 2014).
Conventionele kerosine bracht in 2006 6.0Mton koolstof in de atmosfeer in de BC-vorm en ongeveer 6.6 Mton in de OC-vorm. Bij ongewijzigd beleid zal dat in 2050 ongeveer 2.8 resp. 2.4 maal zoveel zijn (Brasseur et al., 2016).
Veel onderzoekers wijzen erop dat synthetische kerosine volgens het HEFA-proces, het Fischer-Tropsch-proces (FT-proces) op basis van biomassa en aardgas, en het Alcohol to Jet-proces (ATJ-proces nauwelijks of geen aromaten bevat en dus weinig roet en OC produceert (Beyersdorf et al., 2014; Braun-Unkhoff et al., 2016; Brem et al., 2015; Chiaramonti, Prussi, Buffi, & Tacconi, 2014; Christie, Lobo, Lee, & Raper, 2016; Liu et al., 2013; Yang et al., 2018).

In praktijk zijn de voordelen slechts beperkt haalbaar, omdat synthetische kerosine slechts tot hooguit 50% mag worden bijgemengd met conventionele kerosine (ASTM; Hemighaus et al. (2006)).
Coal to Liquid-kerosine, Power To Liquid-kerosine via het methanolprocédé van Mobil (Patrick Schmidt et al., 2018; Tabak, Avidan, & Krambeck, 1986) en kerosine uit pyrolyse bevatten wel aromaten en produceren dus wel relatief veel roet (Liu et al., 2013).

**Onverbrande koolwaterstoffen**
Brasseur et al. (2016) stellen dat mondiaal in 2006 98kton onverbrande kerosine in de atmosfeer kwam. 10 tot 20% daarvan bestaat uit benzeen en een deel daarvan komt vrij in de nabijheid van luchthavens, o.a. bij het taxiën. Benzeen is toxisch.
Het gebruik van synthetische kerosine dringt de emissie van onverbrande koolwaterstoffen mogelijk iets terug (Yang et al., 2018), en brengt de benzeenemissie als fractie van de onverbrande koolwaterstoffen terug in evenredigheid met de bijmengverhouding.

**CO, NO en $NO_2$**
Bij inzet van synthetische kerosine dalen de CO-, NO- en $NO_2$-emissies niet of beperkt (Braun-Unkhoff et al., 2016; Moore et al., 2017; Yang et al., 2018).

*Figuur 7* geeft een schematisch overzicht van alle emissies door straalmotoren.

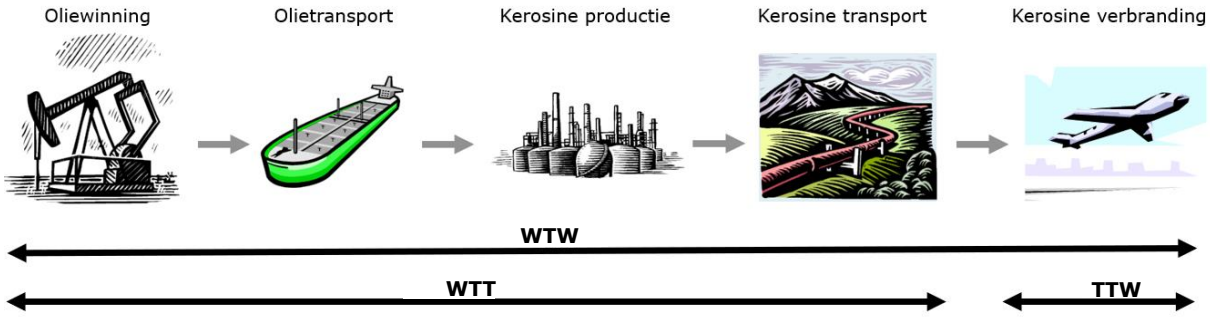



*Figuur 7. Schematisch overzicht van alle emissies (auteur: Herbschleb).*

## 4.2. Life Cycle $CO_{2,eq}$-emissies

### 4.2.1. Algemeen

Naast emissies van toxische stoffen tijdens verbranding van kerosine vindt er ook emissie plaats van broeikasgassen. Voor conventionele kerosine gebeurt dit bij de winning van ruwe olie, het transport van bron naar raffinaderij, het raffineren van olie tot kerosine (productie) en bij het transport van kerosine van raffinaderij naar vliegvelden. De engelse term die voor deze hele levensloop (Life Cycle Assessment, LCA) van vliegtuigbrandstof gebruikelijk is, is 'Well To Wake' of 'Well To Wing' (WTW). WTW wordt opgesplitst in 'Well To Tank' (WTT) en 'Tank To Wake/Wing' (TTW) (Figuur 8).




*Figuur 8. Life Cycle stappen van conventionele kerosine (overgenomen van Stratton, Wong, and Hileman (2010)).*

De opbouw van de Life Cycle (WTT) van de synthetische kerosinesoorten wijkt van Figuur 8 af in de stappen oliewinning en -transport (i.v.m andere feedstock) en de kerosineproductie (i.v.m. andere processen).

De grootste bijdrage in de WTT-emissie van conventionele kerosine op basis van ruwe olie wordt gevormd door de oliewinning (ca. 30%) en de kerosineproductie (38%) (Stratton et al., 2010).

Stratton et al. (2010) hebben de broeikasgasemissie voor elke Life Cycle stap uitgedrukt in hoeveelheid (massa) per eenheid energieverbruik door het vliegtuig (g/MJ). Daarbij hebben zij voor de WTT-fase de emissies van $CO_2$, $CH_4$ en $N_2O$ meegenomen en voor de TTW-fase alleen van $CO_2$. Via de Global Warming Potential (GWP), een maat voor het opwarmingseffect ten opzichte van $CO_2$, worden de $CH_4$ en $N_2O$ massa's omgerekend naar een $CO_2$ massa die hetzelfde opwarmingseffect zou hebben. De eenheid die hierbij gebruikt wordt is $gCO_{2,eq}$/MJ (gram $CO_2$ equivalent per megajoule).

Stratton et al. (2010) hebben voor conventionele kerosine op basis van ruwe olie, oliezanden en schalieolie, Life Cycle WTW-broeikasgasemissies bepaald van respectievelijk 87.6, 103.4 en 121.6 $gCO_{2,eq}$/MJ. In het vervolg van dit rapport worden alleen vergelijkingen gemaakt met conventionele kerosine op basis van ruwe olie.

Tabel 3 geeft een vergelijking van de WTW-broeikasgasemissies tussen conventionele kerosine en de onderzochte synthetische kerosinesoorten. Deze waarden zijn in Figuur 9 gevisualiseerd.

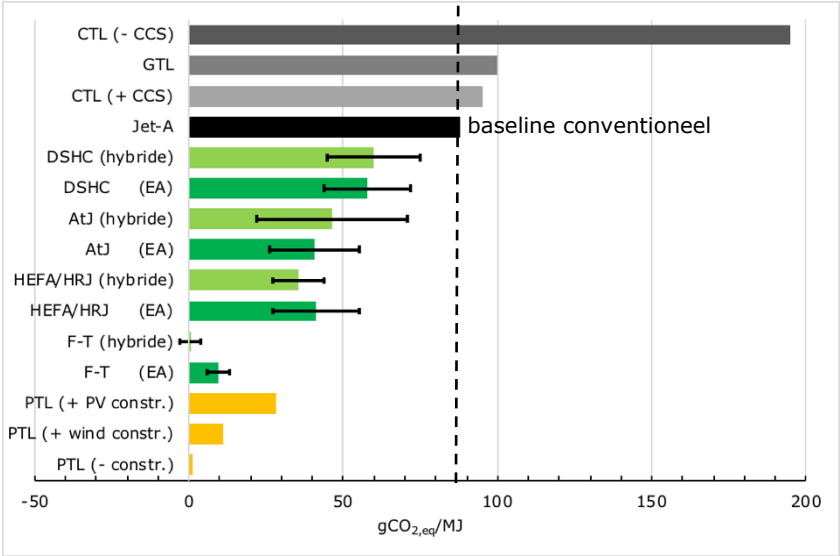
Met behulp van de specifieke energie van de verschillende kerosinesoorten kunnen de WTW-broeikasgasemissies omgerekend worden naar $gCO_{2,eq}$/g brandstof (Tabel 3). Voor de specifieke energie van conventionele kerosine is de afgeronde waarde van Jet-A genomen: 43 MJ/kg (Janic, 2018; Withers et al., 2014; Zschocke, Scheuermann, & Ortner, 2012), voor alle synthetische kerosinesoorten de waarde van synthetische paraffine kerosine SPK (FT&HEFA/ HRJ): 44 MJ/kg (Janic, 2018).

*Tabel 3. WTW-broeikasgasemissie van conventionele en synthetische kerosinesoorten. De spreiding in de waarden voor de biokerosine ondersoorten wordt veroorzaakt door verschillende feedstock.*

| Kerosinesoort | ondersoort | WTW ($gCO_{2,eq}/MJ$) | WTW ($gCO_{2,eq}/g$) |
|---|---|---|---|
| Conventionele kerosine | Jet-A | 88[a] | 3.8 |
| GTL/CTL-kerosine | GTL | 100[b] | 4.4 |
| | CTL (+CCS) | 95[b] | 4.2 |
| | CTL (-CCS) | 195[b] | 8.6 |
| Biokerosine | HEFA/HRJ (EA) | 27-55[c] | 1.2-2.4 |
| | HEFA/HRJ (hybride) | 27-44[c] | 1.2-1.9 |
| | F-T (EA) | 6-13[c] | 0.3-0.6 |
| | F-T (hybride) | -3 -4[c] | -0.1 -0.2 |
| | AtJ (EA) | 26-55[c] | 1.1-2.4 |
| | AtJ (hybride) | 22-71[c] | 1.0-3.1 |
| | DSHC (EA) | 44-72[c] | 1.9-3.2 |
| | DSHC (hybride) | 45-75[c] | 2.0-3.3 |
| PTL-kerosine | PTL (excl. wind/PV constr.) | 1[d] | <0.1 |
| | PTL (incl. wind/PV constr.) | 11/28[d] | 0.5-1.3 |

[a] Stratton et al. (2010)
[b] Blakey, Rye, and Wilson (2011)
[c] De Jong, Antonissen, et al. (2017)
[d] Patrick Schmidt et al. (2018)

(WTW=Well to Wing; GTL=Gas-to-Liquid, CTL=Coal-to-Liquid, CCS=Carbon Capture and Storage, HEFA/HRJ=Hydroprocessed Esters and Fatty Acids/Renewable Jet fuel, F-T=Fischer-Tropsch, AtJ=Alcohol to Jet, DSHC=Direct Sugar to Hydrocarbons, EA=Energy Allocation, hybride=EA en Displacement methode, PTL=Power-to-Liquid, PV=photo-voltaic).




*Figuur 9. Life Cycle WTW-broeikasgasemissie van conventionele en synthetische kerosinesoorten. De foutenbalken bij de biokerosine ondersoorten geven de spreiding weer door verschillende feedstock.*

Veruit de grootste bijdrage in de WTW-emissieverschillen tussen synthetische en conventionele kerosine zit in de 'Well To Tank' (WTT)-emissie. Synthetische kerosine produceert bij verbranding ongeveer dezelfde hoeveelheid $CO_{2,eq}$ als conventionele kerosine. De TTW-emissies verschillen dus weinig; ca. 70 $gCO_{2,eq}$/MJ voor SPK (FT&HRJ) (Janic, 2018) tegen 73 $gCO_{2,eq}$/MJ voor Jet A (Stratton et al., 2010).

### 4.2.2. GTL- en CTL-kerosine

Uit Tabel 3 en Figuur 9 blijkt dat de WTW-broeikasgasemissie van GTL-kerosine ruim 15% hoger is dan van conventionele kerosine, van CTL-kerosine zonder $CO_2$-afvang en -opslag (CCS) 123% hoger en van CTL mét CCS 11% hoger.

Volgens Blakey et al. (2011) genereert de raffinage van de feedstock, in dit geval dus de fossiele brandstof aardgas voor GTL, respectievelijk steenkool voor CTL, vergelijkbare of iets hogere WTT-broeikasgasemissies dan de raffinage van ruwe olie.

De extra WTT-emissies worden bij GTL-kerosine vooral toegeschreven aan de winning en het transport van aardgas en aan de lekkage van methaan tijdens de gaswinning (dat laatste gemiddeld 2.5% van de WTW-emissie volgens Withers et al. (2014)). Case studies geven echter aan dat de WTW-emissies van GTL-processen ook 13-15% lager kunnen zijn dan van conventionele fossiele brandstofprocessen (Baliban, Elia, & Floudas, 2013), onder andere door het gebruik van bepaalde aardgas feedstock die anders zou worden afgefakkeld, waarbij deze "emissie-winst" aan het GTL-proces wordt gealloceerd (Baliban et al., 2013).

De extra WTT-emissie van CTL-kerosine is toe te schrijven aan de FT-processtap in de synthese, waarbij CCS betrekking heeft op de hierbij geproduceerde $CO_2$ (Blakey et al., 2011; Vallentin, 2008).

### 4.2.3. Biokerosine

Van alle biokerosinesoorten in Tabel 3 en Figuur 9 liggen de Life Cycle WTW-broeikasgasemissies aanzienlijk lager dan van conventionele en GTL/CTL-kerosine. Daarom wordt biokerosine (met name HEFA/HRJ brandstoffen) door de vliegtuigindustrie breed beschouwd als een van de belangrijkste manieren om de koolstof-voetafdruk te reduceren (C. Zhang et al., 2016).

Voor of na de vorming van biokerosine wordt $CO_{2,eq}$ vastgelegd (WTT). Meestal wordt dit uitgedrukt als een percentage van de TTW-emissie en boekhoudkundig wordt dit geboekt als negatieve WTT-emissie.

Bij biokerosine kan men de geproduceerde $CO_{2,eq}$ over de gehele levensloop (LCA) op verschillende manieren berekenen. Alle LCA-berekeningen maken immers keuzes in de scope, de systeemgrenzen, toerekeningsmodellen, enz. Bij de productie van biokerosine ontstaat bijvoorbeeld ook een scala aan andere producten, waarvan sommige aangemerkt kunnen worden als brandstof en andere bijvoorbeeld als voedingsmiddel (bijv. camelinaolie en camelinameel).

In de Energy Allocation (EA) methode worden slechts producten meegenomen die het karakter hebben van een brandstof. De energie-inhoud van die producten wordt per feedstock-productcombinatie opgeteld.

In de Displacement methode wordt alle $CO_{2,eq}$ opgeteld die op enige wijze geëmitteerd of bespaard is in alle eindproducten. De som kan zelfs negatief zijn (netto wordt dan $CO_{2,eq}$ vastgelegd).

De Jong, Antonissen, et al. (2017) kiezen voor een berekening op basis van enkel Energy Allocation en een hybride-berekening op basis van een compromis tussen Energy Allocation en de Displacement methode. In deze berekeningen (Zie Tabel 3 en Figuur 9) zijn de $CO_{2,eq}$ ten gevolge van de directe of indirecte wijzigingen in het gebruik van de bodem niet meegeteld.

### 4.2.4. PTL-kerosine

Om te bepalen wat de geproduceerde $CO_{2,eq}$ zijn over de gehele levensloop (WTW) van PTL-kerosine wordt gekeken naar 1) de gebruikte $CO_2$-bron in het productieproces en 2) de oorsprong van de energie die gebruikt wordt om PTL te produceren.

Ad 1) $CO_2$ voor de productie van PTL kan komen uit de atmosfeer of van afvalgasstromen van de industrie (geconcentreerde fossiele bronnen), die anders direct in de atmosfeer waren gebracht. Echter, onder andere (Bracker, 2017) en Patrick Schmidt et al. (2018) geven aan dat koolstof van een fossiele bron van nature niet hernieuwbaar is. Daarom wordt bij de LCA van PTL uitgegaan van het gebruik van $CO_2$ uit de atmosfeer. De kosten om $CO_2$ uit de atmosfeer te halen zijn echter hoger dan de kosten om $CO_2$ uit geconcentreerde fossiele bronnen te halen. Hoewel voor de lange termijn geconcentreerde bronnen geen optie zijn i.v.m. het terugdringen van het gebruik van fossiele brandstoffen, kunnen deze voor de korte termijn wel worden benut om de kosten te beperken. Quintel (2018) geeft aan dat Tata-Steel uit IJmuiden genoeg $CO_2$-uitstoot om 50% van het vliegverkeer op Schiphol (dd 2016) te kunnen voorzien van de hoeveelheid $CO_2$ die nodig is voor het PTL-proces.

Ad 2) De Life Cycle WTW-broeikasgasemissie van PTL wordt voor het grootste deel veroorzaakt door de elektriciteit die nodig is voor de elektrolyse (WTT). Essentieel voor een lage WTT-emissie is dat alle energie duurzaam wordt opgewekt. Door de energieverliezen bij het proces om PTL-brandstof (diesel of kerosine) te produceren zou bij gebruik van fossiele energie de WTW-broeikasgasemissie ongeveer 6 keer zo hoog zijn als van conventionele kerosine (Edwards et al., 2013). P. Schmidt and Weindorf (2016) hebben voor de productie van PTL in Duitsland met behulp van duurzame energie (wind en PV) een WTW-emissiewaarde van ca. 1 $gCO_{2,eq}$/MJ gevonden. De constructies (incl. ontwikkeling) die de duurzame energie leveren, zitten vaak niet in de LCA. P. Schmidt and Weindorf (2016) hebben gevonden dat bij windenergie 10 $gCO_{2,eq}$/MJ moet worden toegevoegd en bij PV (zonne-energie) 27 $gCO_{2,eq}$/MJ.

# 4.3. De prijs van synthetische kerosine

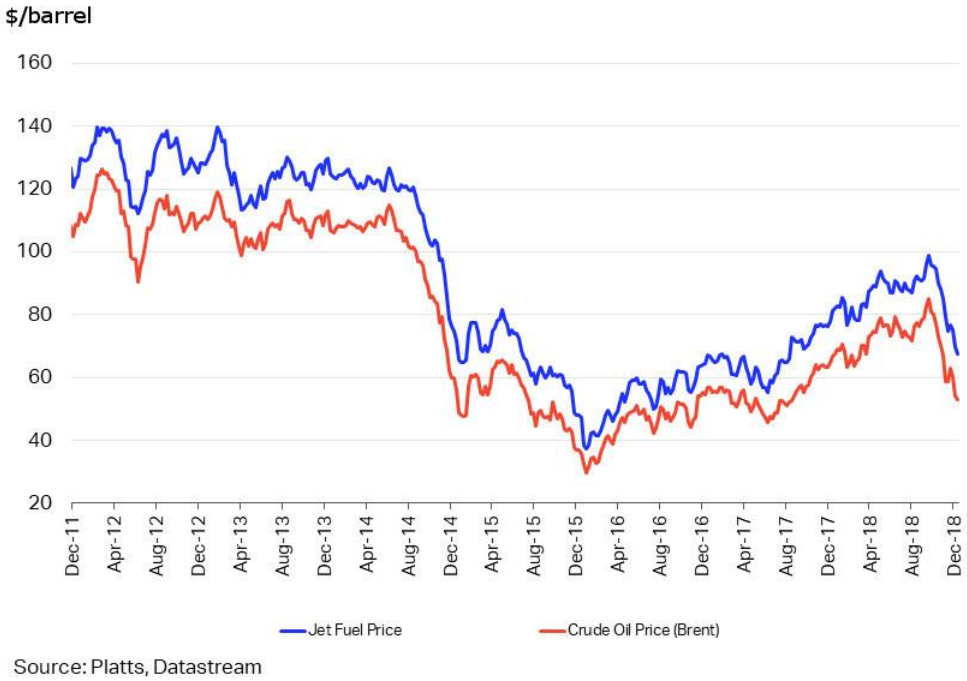
## 4.3.1. Inleiding

Het gebruik van synthetische kerosine hangt zeer sterk af van het prijsverschil met conventionele kerosine (Deane & Pye, 2018; J. R. Faber, 2017). Het is van belang om een indruk van de prijs van conventionele en synthetische kerosine te krijgen.
Hieronder volgt een prijsindicatie van achtereenvolgens conventionele kerosine, Gas-to-Liquid-kerosine, Coal-to-Liquid, biokerosine en Power-to-Liquid-kerosine. Daarna volgt een schatting van de doorwerking in de prijs van een ticket.

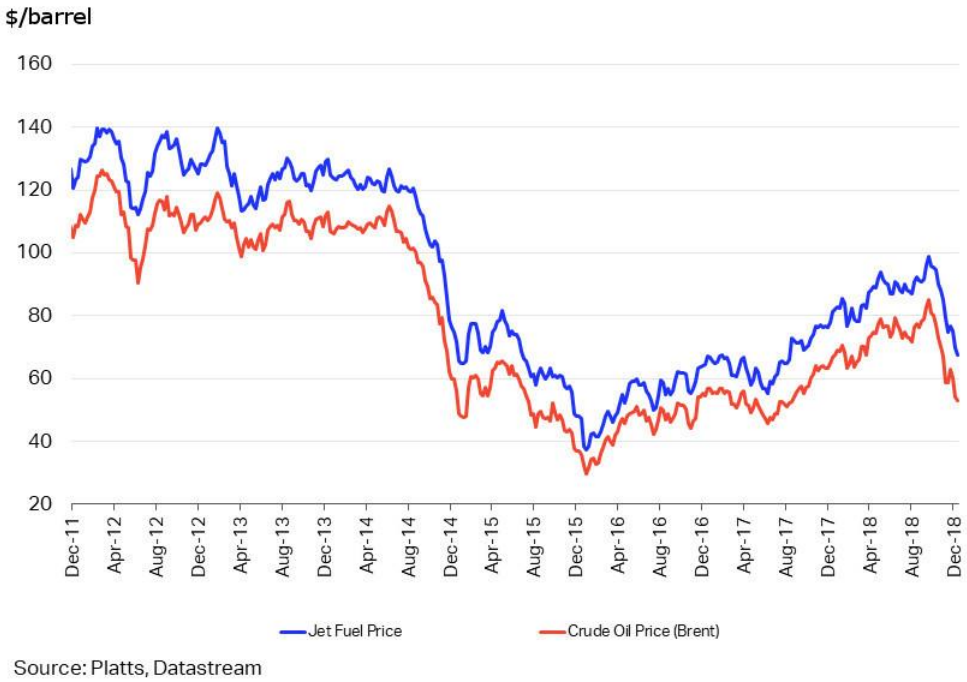
## 4.3.2. Kerosineprijzen

### 4.3.2.1 Conventionele kerosine

De prijs van conventionele kerosine hangt van omstandigheden af die niet in het kader van deze studie geadresseerd kunnen worden. Men kan er slechts als een extern gegeven kennis van nemen. Zie




*Figuur 10*.




*Figuur 10. De ontwikkeling van de ruwe olie- en jet fuel prijs (IATA_Jet_Fuel_price_monitor, 2018) (100$/barrel = 0.63$/liter = 0.79 $/kg).*

#### 4.3.2.2 GTL- en CTL-kerosine

In het hierna volgende is, waar nodig, de dollar omgerekend naar de Euro op basis van de koers op 1 juli van het jaar van publicatie van de betreffende studie.

Withers et al. (2014) geven voor GTL-kerosine een prijs tussen de 0.86 en 1.07€/kg, en voor conventionele kerosine een prijs tussen de 0.51 en de 1.06€/kg (zie Tabel 4).

*Tabel 4. Minimale brandstofprijs van GTL- en conventionele kerosine volgens Withers et al. (2014).*

| Olieprijs scenario | GTL-kerosine | | | Conv. kerosine | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ($/l) | ($/kg) | (€/kg) | ($/l) | ($/kg) | (€/kg) |
| Laag | 0.94 | 1.18 | 0.86 | 0.56 | 0.70 | 0.51 |
| Modaal | 0.99 | 1.23 | 0.90 | 0.79 | 0.99 | 0.72 |
| Hoog | 1.17 | 1.46 | 1.07 | 1.16 | 1.45 | 1.06 |

Bij een hoge olieprijs is GTL-kerosine ongeveer even duur als conventionele, en bij een lage olieprijs ongeveer 67% hoger.

Baliban et al. (2013) komen op kosten voor GTL-kerosine op

- $101 - $122/bbl ($0.64 - 0.77 /liter of €0.62 - 0.74/kg) voor een fabriek van 1000 bbl/dag
- $52 - $64/bbl ($0.33 - 0.40/liter of €0.32 - 0.39/kg) voor een fabriek van 200,000 bbl/dag

Jovanović, Klimek, and Quintero (2015) stellen dat GTL-kerosine kostenconcurrerend kan worden met conventionele kerosine bij voldoende marktbeschikbaarheid.

Samengevat kan als een vuistregel worden geformuleerd dat GTL-kerosine nu 1 tot 1.5 * zo duur is als gemiddeld geprijsde conventionele kerosine, en dat dat kan zakken tot iets goedkoper.

Jovanović et al. (2015) stellen ook dat CTL-kerosine ongeveer even duur kan zijn als GTL-kerosine, op voorwaarde dat de $CO_2$ wordt opgeslagen met CCS-technologie.

#### 4.3.2.3 Biokerosine

Verschillende auteurs hebben een economische analyse gemaakt van de kostprijs, die biokerosine (soms in een nader aangeduid jaar) zou moeten krijgen. Omdat de diverse feedstock-proces combinaties sterk verschillen, zit er, met name in studies die een uitspraak doen over een range aan technieken, ook een range aan prijzen. Veel prijzen moeten eerder als indicatie dan als exacte voorspelling gezien worden. Zie

*Tabel 5*.

*Tabel 5. Biokerosineprijzen bij een aantal auteurs.*

| Document | | Prijs per kg | Bron |
|---|---|---|---|
| Techn. Roadmap Biofuels for Transport | | | (Eisentraut, Brown, & Fulton, 2011) |
| Gunstig scenario, | 2020 | 0.79 €/kg | |
| | 2030 | 0.70 | |
| Ongunstig scenario | 2020 | 0.91 €/kg | |
| | 2030 | 0.83 | |
| Sust. biokerosine: Process routes & industrial demonstration activities in aviation biofuels | | | (Chiaramonti et al., 2014) |
| FT – brandstof | 2020 | 0.55 a 3.65 €/kg | |
| HEFA | 2020 | 0.91 a 1.06 €/kg | |
| Bio-jet fuel conversion technologies | | | (Wang & Tao, 2016) |
| HEFA (HRJ) | 2020 | 1.29 – 2.74 €/kg | |
| DSH | 2020 | 2.14 €/kg | |
| RJF in the EU – scenario's and Preconditions .. .towards 2030 | 2020 | 0.90 – 6.20 €/kg | (De Jong, Hoefnagels, et al., 2017) |
| Strategic action Scen. | 2025 | 1.47 €/kg | |
| Strategic action Scen. | 2030 | 1.47 €/kg | |
| Overheidsmaatregelen biokerosine | | | (J. R. Faber, 2017) |
| | 2020 | 1.62 €/kg | |
| middenscenario | 2030 | 1.50 €/kg | |
| hoog scenario | 2030 | 1.04 €/kg | |
| Techno-economic and environmental analysis of aviation biofuels | 2020 | €0.83 – 2,85 €/kg | (Neuling & Kaltschmitt, 2018) |
| Renewable jet fuel supply scenarios in the European Union in 2012-2030 | 2021 | 2.32 €/kg | (De Jong et al., 2018) |
| | 2030 | 1.26 – 1.52 €/kg | |
| Roadmap to decarbonising European aviation | | 1.20 €/kg | (Murphy et al., 2018) |

Samengevat kan als een vuistregel worden geformuleerd dat biokerosine nu 2 tot 4 keer zo duur is als conventionele kerosine, en dat de prijs nog wat kan zakken.

#### 4.3.2.4 PTL-kerosine

Een aantal auteurs heeft een verwachting uitgesproken voor de korte termijn en de lange termijn (2050) (zie Tabel 1).

*Tabel 6. Kostenoverzicht van FT- en Methanol-PTL productie nu en in 2050.*

| Document | FT jet/diesel route (€/kg) | | Methanol jet/diesel route (€/kg) | | Verwijzing |
|---|---|---|---|---|---|
| | Korte termijn | Lange termijn | Korte termijn | Lange termijn | |
| Electrofuels for the transport sector | 1.51 – 8.96 (central 2.7) | 1.28 – 3.95 (central 2.1) | 1.86 – 12.21 (central 3.3) | 1.51 – 5.00 (central 2.5) | (Brynolf, Taljegard, Grahn, & Hansson, 2017) |
| Carbondioxide utilisation for production of transport fuels: process and economic analysis. | | | | | (Dimitriou et al., 2015) |
| Small (0.5 MW) | 23.11 | | | | |
| Medium (500 MW) | 2.93 | | | | |
| Large (900 MW) | 1.76 | | | | |
| Concept for the generation of synthetic fuel from $CO_2$ and H2 | | | | | (König , Baucks, Dietrich, & Wörner, 2015) |
| Energiebron offshore wind | 3.15 | | | | |
| PTL potentials.. of renewable aviation fuel | | | | | (P. Schmidt & Weindorf, 2016) |
| $CO_2$ direct uit de lucht | | 1.84 | | 1.72 | |
| Renewables in transport 2050 geïmporteerde zonne-energie uit geconcentreerde $CO_2$-bronnen | | 2.06 - 2.41 | | 2.1 - 2.28 | (P. Schmidt, Zittel, Weindorf, & Raksha, 2016) |
| Roadmap to decarbonising European aviation | | 2.1* | | | (Murphy et al., 2018) |

** Geen onderscheid tussen FT en Methanol*

De vuistregel is dat PTL-kerosine op korte termijn zes maal duurder is dan conventionele kerosine, en in 2050 ongeveer 3 tot 4 * zo duur.

### 4.3.3. Ticketprijzen

Men kan het procentsgewijze effect van duurdere brandstof op de ticketprijs eenvoudig schatten. Brandstof maakt ca 25% tot 33% van de kosten van de tocht met een vliegtuig uit. In Roadmap to Decarbonizing European Aviation rekenen Murphy et al. (2018) met 25% binnen Europa.
Als een techniek de kerosine bijvoorbeeld 2* zo duur maakt en de bijmenging 10% is, komt er bij de ticketprijs maar 1/40$^{ste}$ deel bij (op een ticket binnen Europa van €200 komt er €5 bij).

Enkele auteurs hebben een schatting gemaakt van de meerkosten van een ticket (De Jong, Hoefnagels, et al., 2017; De Jong et al., 2018; Deane & Pye, 2018; J. R. Faber, 2017).
De aannames bij deze schattingen verschillen zo sterk, dat het niet mogelijk is daar een consistent verhaal van te maken. Als men het bijmengpercentage aan biokerosine op 5% stelt, en als men zich beperkt tot vluchten binnen Europa, resulteert dat bij alle auteurs in een meerprijs per ticket in de orde van grootte van €2.

## 4.4. Gevolgen voor vliegtuigen en infrastructuur

### 4.4.1. Gevolgen voor vliegtuigen

De samenstelling van synthetische kerosine verschilt ten opzichte van conventionele kerosine door een lager aromaat gehalte en een lagere dichtheid. Volgens vele onderzoeken (onder andere Al-Nuaimi et al. (2016), Liu et al. (2013) en C. Zhang et al. (2016)) zijn aromaten nodig voor het opzwellen van afdichtringen in het brandstofsysteem, die bij een te laag percentage aromaten kunnen gaan lekken. Al-Nuaimi et al. (2016) noemen ook verminderde smeringseigenschappen als mogelijke problemen bij een gebrek aan aromaten.

Daarnaast resulteert de iets lagere dichtheid van FT-brandstoffen in afwijkingen van de bepaling van de tankinhoud (Al-Nuaimi et al., 2016; Liu et al., 2013; C. Zhang et al., 2016).

#### 4.4.1.1 Aanpassing vliegtuigen

De huidige insteek is om niet de vliegtuigen aan te passen aan deze andere eigenschappen van synthetische kerosine, maar de kerosine zelf. Vliegtuigen worden enkele decennia gebruikt en daarom zullen oude en nieuwe vliegtuigen op hetzelfde vliegveld tanken. De American Society for Testing and Materials (ASTM) heeft strenge eisen gesteld aan de samenstelling van alle kerosine via ASTM D1655 en laat nu alleen synthetische kerosine toe mits gemengd met conventionele kerosine volgens ASTM D7566.

#### 4.4.1.2 Achtergronden bijmengen

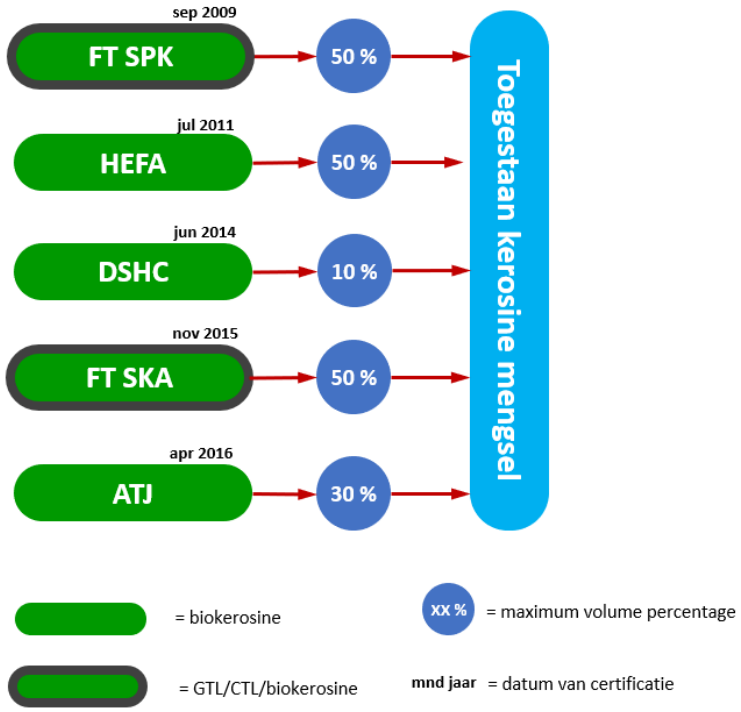
Via het mengen van de synthetische kerosine met conventionele kerosine worden de negatieve effecten van de lagere aromaatconcentratie op de afdichting van het brandstofsysteem en dichtheid vermeden. ASTM D7566 schrijft een minimum aromaatgehalte in semisynthetische blends voor van 8.0 vol% (Kick et al., 2012; C. Zhang et al., 2016). Conventionele kerosine mag maximaal 25 vol% aromaten bevatten volgens ASTM D1655 (Liu et al., 2013).

Tot nog toe zijn 5 verschillende alternatieve kerosinesoorten gecertificeerd door de ASTM en gedefinieerd als zogenaamde ‘drop-in’ vliegtuigbrandstof, die zonder enige wijziging aan bestaande vliegtuigmotoren en infrastructuur kan worden gebruikt in een mengsel met conventionele kerosine volgens ASTM D7566 (Richter, Braun-Unkhoff, Naumann, and Riedel (2018). Het maximaal toegestane percentage synthetisch kerosine in zo’n mengsel is daarin per kerosinesoort vastgesteld en varieert van 10 tot 50% volume (Richter et al., 2018). Zie Figuur 11.

De toegestane kerosinesoorten zijn (FAA, 2016):

- Synthesized Iso-parafins (SIP) vanuit suiker
- Alcohol-to-Jet (ATJ)
- Hydrotreated Esters and Fatty Acids (HEFA) vanuit vetten en oliën van biologische oorsprong
- Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene (FT-SPK) en Fischer-Tropsch Synthetic Kerosene met Aromaten (FT-SKA) van renewable biomassa (BTL), aardgas (GTL) of steenkool (CTL)

Romanczyk et al. (2019) hebben het zwelgedrag van gangbare O-ringen in vliegtuigbrandstofsystemen onder invloed van aromaten en niet-aromaten onderzocht en vonden ook significant zwelgedrag onder niet-aromatische verbindingen. Het roetvormingsonderzoek van Das et al. (2017) toont aan dat het zwelgedrag van stoffen niet recht evenredig is met de roetemissie van diezelfde stof. Mogelijk kan verder onderzoek aantonen of een niet-aromaat voldoende zwelgedrag genereert of een aromaat opleveren met voldoende zweleffect maar met zeer weinig roetvorming. Indien deze verbindingen als additief kunnen worden ingezet, zou in de toekomst mogelijk het bijmengen van synthetische kerosine met conventionele kerosine achterwege gelaten kunnen worden zonder benodigde aanpassing van de afdichtingsmaterialen van brandstofsystemen, en mogelijk met minder of zelfs geen aromaten in de brandstof.




*Figuur 11. Toegestane kerosinesoorten en maximum volumepercentages per ASTM D7566 (naar Richter et al. (2018)).*

## 4.4.2. Gevolgen voor infrastructuur vliegvelden

ASTM D7566 stelt geen eisen aan de locatie van het bijmengen van de synthetisch kerosine met de conventionele kerosine, maar het wordt nu algemeen geaccepteerd dat een pure synthetische kerosine niet in de buurt mag komen van de tankfaciliteiten op een vliegveld zolang die niet voldoet aan de ASTM D1655 eisen voor kerosine (IATA, 2015). Wanneer een vliegveld gebruikt maakt van vaste tanks is het voorstelbaar dat er extra tanks worden neergezet voor de blends om bijvoorbeeld een prijs-verschil te kunnen hanteren. Wanneer er van mobiele tankfaciliteiten (dwz tankwagens) gebruik wordt gemaakt en de synthetische kerosine bijgemengd wordt voor deze het vliegveld bereikt, zijn er geen gevolgen. Volgens Janic (2018) hebben FT-brandstoffen een vergelijkbaar gedrag als conventionele kerosine wat betreft compatibiliteit met vliegtuigapparatuur en de bestaande brandstof-infrastructuur op de grond.

# 4.5. Gevolgen voor land/watergebruik en voedselproductie

## 4.5.1. Conventionele, GTL- en CTL-kerosine

Omdat bij de productie van conventionele, GTL- en CTL-brandstoffen fossiele bronnen (aardolie, aardgas en steenkool) worden gebruikt als feedstock, leggen alleen de productieplants en de benodigde infrastructuur voor de winning van grondstoffen en het transport van grondstoffen en eindproducten potentieel beslag op land dat anders eventueel voor voedselproductie ingezet had kunnen worden. Er zijn in de geraadpleegde literatuur echter geen gevolgen hiervoor bekend en in dit onderzoek wordt daarom aangenomen dat de gevolgen voor landgebruik en voedselproductie te verwaarlozen zijn.

Het waterverbruik voor de productie van conventionele kerosine (olieraffinage) ligt tussen de 0.03 en 0.07 $m^3GJ^{-1}$ (King & Webber, 2008). Het waterverbruik voor de productie van GTL- en CTL-kerosine is niet bekend maar zal waarschijnlijk dicht bij dat voor de omzetting van aardgas, respectievelijk steenkool in FT-diesel liggen (ca. 0.1-0.7 $m^3GJ^{-1}$; (Stratton et al., 2010)), dus tot ca. 10 maal zo veel als conventionele kerosine.

## 4.5.2. Biokerosine

De inzet van agrarische grond voor de productie van biomaterialen, waaronder biobrandstoffen, kan leiden tot concurrentie met de lokale voedselproductie. De eerste generatie biobrandstoffen bestond uit gewassen die ook als voedsel voor mens of dier dienden. Concurrentie om onder andere water en kunstmest verscherpte dit spanningsveld.
De luchtvaart heeft dit eerste generatie-stadium overgeslagen en zich vanaf het begin gebaseerd op tweede generatie biobrandstoffen. Deze generatie wordt ook wel aangeduid als “advanced”. Tweede generatie bronnen zijn “non-food” en hebben een hoger rendement. Hierbij kan het gaan om agrarische of bos-residuen, mest en andere vormen van agrarisch afval, maar ook om gewassen die niet eetbaar zijn en verbouwd kunnen worden op arme grond (zoals Jatropha, Miscanthus, Camelina, wilg of populier). Sommige gewassen leveren oliën, andere leveren lignocellulose als feedstock voor biokerosine.
De luchtvaart heeft dus voor zichzelf de lat hoger gelegd dan bij andere gebruikers van biobrandstof. Dit is vooral een gevolg van zelfregulering, enerzijds via de RSB (Roundtable Sustainable Biomaterials) en anderzijds via de SAFUG (Sustainable Aviation Fuel Users Group). De SAFUG is er specifiek voor de luchtvaart met als doel het bevorderen van de ontwikkeling en de productie van duurzame vliegtuig-brandstof.
De RSB is er in algemene zin voor alle biomassa, werkt ook veel voor de luchtvaart en heeft een certificerende functie. De RSB zet de algemene standaard voor biomaterialen die ‘duurzaam’ heten. Er is niet alleen een certificering die toegespitst is op de RED-II (Renewable Energy Directive) van de EU, maar er zijn ook mondiaal bedoelde certificeringen of certificeringen gericht op andere vraagstukken (RSB, 2018). RED-II specificeert welke bronnen als “advanced” worden aangeduid, en welke “UCOAF” (Used Cooking Oil and Animal Fat) heten. Door de keuzes die bij de definitie van “advanced fuels” gemaakt zijn, is het risico dat energiegewassen t.b.v. biokerosine de voedsel-productie schaden, sterk verkleind. Er is echter een restrisico; als de winstgevendheid van energie-gewassen voldoende groot is, komt de keuze om op reguliere landbouwgrond energiegewassen te verbouwen in plaats van voedsel weer in beeld. Anders dan de EU-wetgeving voor de uitfasering van 1e generatie biobrandstoffen, zijn de RSB- en SAFUG-afspraken onderling binnen de luchtvaartsector overeengekomen en hebben geen kracht van wet of verdrag. Bovendien vraagt de teelt van energie-gewassen om grote oppervlaktes.

Het gevaar is dan dat de voedselproductie verschuift naar andere gebieden, die daartoe mogelijk ontgonnen moeten worden. Voor deze Indirect Land Use Change (ILUC) bestaat veel aandacht. De Tweede Kamer heeft er een Richtlijn over aangenomen (Platform-Duurzame-Brandstoffen, 2018) en die verwerkt in de Wet milieubeheer.
Voor zover "advanced biofuels" gebaseerd zijn op residuen en afval, gebruiken ze geen land. Hiervan gaat onder andere de lobby-organisatie van de gezamenlijke milieubewegingen op transportgebied, T&E (Transport & Environment) uit (Murphy et al., 2018).
De "advanced biofuels" die gebaseerd zijn op de teelt van olie- of lignocellulose leverende gewassen gebruiken wél land. Maar deze gewassen zijn zo geselecteerd dat ze op arme grond kunnen groeien en weinig water, bestrijdingsmiddelen en kunstmest vragen. De oppervlakte-specifieke opbrengst bedraagt ca. 15-50 GJ $ha^{-1}a^{-1}$ voor Jatropha olie (HEFA) en 47-171 GJ $ha^{-1}a^{-1}$ voor bosbouw met korte omlooptijd (FT-BTL) (Patrick Schmidt et al., 2018).
Miscanthus (het energiegewas met de meeste opbrengst) kan ongeveer 90 GJ $ha^{-1}a^{-1}$ leveren aan ethanol (Y. Zhang et al., 2018). Bij een omzettingsrendement van ongeveer 2/3$^{de}$ via de AtJ–route (Wang et al., 2016) levert Miscanthus netto aan biokerosine ongeveer 60 GJ $ha^{-1}a^{-1}$. Zodoende vraagt 1PJ biokerosine dan ca. 170 $km^2$. Mocht de Miscanthus-teelt financieel aantrekkelijk worden, dan gaat het dus al gauw om grote gebieden. Om dit in perspectief te plaatsen: het huidige Europese verbruik aan kerosine is ongeveer 2200PJ per jaar (Eurostat, 2018), en het sectorplan van de Nederlandse luchtvaart wil in 2030 voor 25PJ aan biokerosine produceren . (Schiphol et al., 2018)
Het waterverbruik voor de productie van biobrandstoffen betreft zowel "groen" (neerslag opgeslagen in vegetatie, in of op de grond) als "blauw" (oppervlakte- en grond-) water. Enkele gesommeerde waarden zijn 112 $m^3GJ^{-1}$ voor FT-BTL uit populier en 574 $m^3GJ^{-1}$ voor Jatropha olie (HEFA) (Patrick Schmidt et al., 2018).

## 4.5.3. PTL-kerosine

Het gebruik van bodem en water voor de productie van PTL-brandstof kan invloed hebben op de voedselproductie of de beschikbaarheid van drinkwater.
De invloed van de productie van PTL op de voedselproductie is echter beperkt doordat er geen akkerland voor nodig is. Wel gaat dit onderzoek er vanuit dat hernieuwbare energie (wind en zonne-energie) wordt gebruikt voor de productie van PTL. Met name in het geval van windenergie kan het benodigde land nog steeds voor andere functies, zoals voedselproductie, gebruikt worden. En zo kan voor de grootschalige opwekking van zonne-energie gekozen worden voor locaties die niet geschikt zijn voor voedselproductie (of andere functies), zoals woestijngebieden. Hierdoor is het risico van concurrentie tussen energie en voedselproductie (of andere landfuncties) sterk verminderd (Patrick Schmidt et al., 2018).
De oppervlakte-specifieke opbrengst van PTL bedraagt ca. 500-1000 GJ $ha^{-1}a^{-1}$, overeenkomend met een haalbare vliegafstand van ca. 4000-9000 km $ha^{-1}a^{-1}$, afhankelijk van het productiepad (via PV- of windenergie). Dit is grofweg een factor 5-50 meer in vergelijking met bovengenoemde biobrandstoffen (Patrick Schmidt et al., 2018).

Bij de PTL-brandstofproductie is water vooral nodig als waterstofbron in de waterelektrolysestap. Het waterverbruik voor deze productie betreft uitsluitend "blauw" water en bedraagt ca. 0.04 $m^3GJ^{-1}$ (FT-, resp. methanolroute; Patrick Schmidt et al. (2018)). Dit is vergelijkbaar met het watergebruik van conventionele kerosine en vele ordes van grootte minder in vergelijking met biobrandstoffen. Ook al kan dit als verwaarloosbaar worden beschouwd in vergelijking met biobrandstoffen, de lokale water-beschikbaarheid en aanvoermogelijkheden zijn relevante aspecten die meestal worden meegenomen in lokale milieu-effectbeoordelingen voor fabrieksgoedkeuring (Patrick Schmidt et al., 2018).

# 4.6. Beschikbaarheid naar volume en tijd

## 4.6.1. CTL-kerosine

Kolenvergassing is al 100 jaar commercieel en sinds 4 decennia in gebruik voor stroomopwekking. In Zuid-Afrika draait een fabriek van Sasol op commerciële schaal voor de productie van CTL-brandstof. Als alternatief voor de vergassingsroute ('indirect coal liquefaction') van Sasol, heeft de Shenhua groep in China een commerciële CTL-fabriek gebouwd die gebaseerd is op 'direct coal liquefaction' technologie (Floudas, Elia, & Baliban, 2012).
Sasol maakte in 2012 160 kBD (kilobarrel per dag) uit CTL, maar vooral voor auto's. China hoopt binnen een jaar of 5 á 10 (na 2013) rond de 400 kBD uit CTL te maken, goed voor een vermindering van de olie-import van 5 à 10% (Liu et al., 2013).
Voor specifiek vliegtuigbrandstof wordt binnen niet al te lange tijd een mondiale productie van ca. 75 kBD uit CTL verwacht (Liu et al., 2013), ofwel 3.55 Tg of 156 PJ per jaar (op basis van een dichtheid van CTL-kerosine van 816 kg/m$^3$ (Braun-Unkhoff & Riedel, 2015; Kick et al., 2012) en een specifieke energie van 44 MJ/kg). Dit zou op jaarbasis neerkomen op 1.3% van de mondiale vliegtuigbrand-stofconsumptie door de commerciële luchtvaart in 2017 (90 miljard gallon (Statista, 2018), ofwel ca. 273 Tg (op basis van een gemiddelde dichtheid van conventionele kerosine van 800 kg/m$^3$)) of op ongeveer de totale jaarlijkse afzet van kerosine op Schiphol over 2014 (3.525 Tg (CBS, 2018)). Prognoses voor de toekomstige productie zijn in de geraadpleegde literatuur niet gevonden.

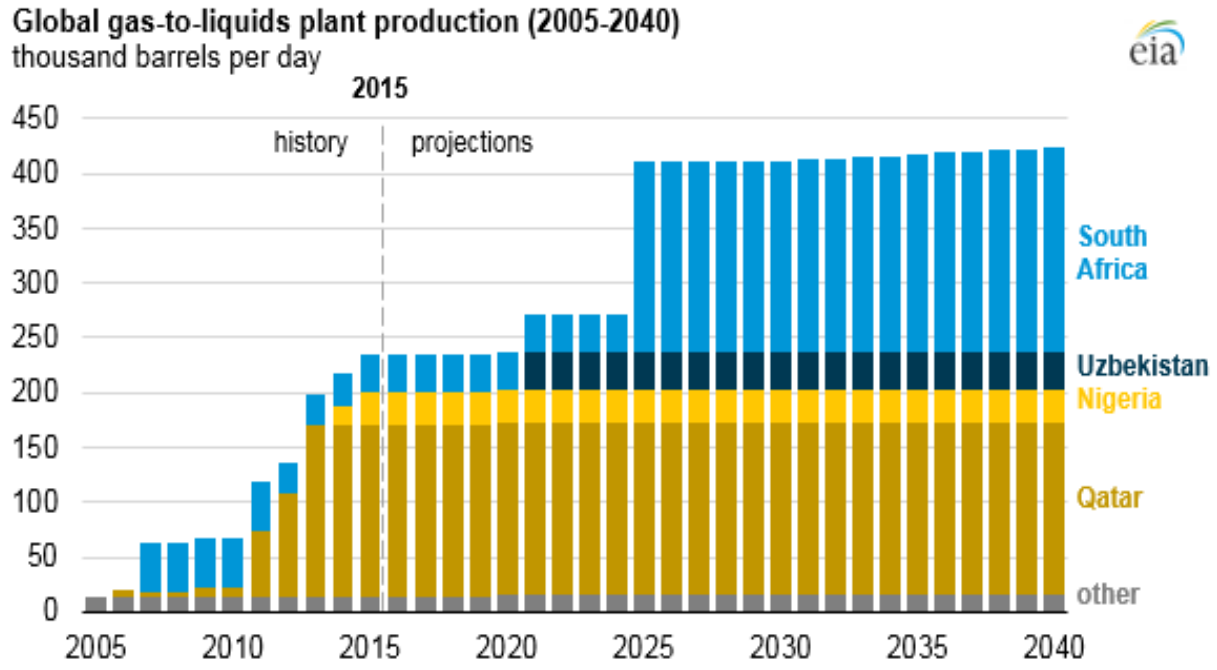
## 4.6.2. GTL-kerosine

***De huidige situatie***

GTL is de meest vercommercialiseerde FT-technologie, hoofdzakelijk door de behoefte aan het benutten van zogenaamde 'stranded' (ongebruikt om fysische of economische redenen) aardgas-reserves wereldwijd. Sasol heeft sinds juni 2006 de ORYX GTL fabriek in Qatar operationeel met een productie van 34 kBD aan diesel, nafta en LPG- producten. Sindsdien heeft Sasol gekeken naar zowel uitbreiding van het ORYX project tot een productie van 100 kBD als naar de ontwikkeling van een nieuwe fabriek in Nigeria. 'Recent' (2011) heeft Shell het Pearl GTL-project gelanceerd in Qatar, met een capaciteit van in totaal 260 kBD aan lichte olieproducten en olie-equivalente brandstoffen. Een grote zorg bij de productie van GTL is echter de onzekerheid over de kapitaalkosten van de fabriek (Floudas et al., 2012).
Een GTL-fabriek van Shell in Maleisië produceert sinds 1993 circa 15 kBD aan op kerosine gelijkende brandstof. De nieuwe GTL-fabriek van Shell in Qatar is hierop gebaseerd en produceert 140 kBD aan vloeibare brandstof (GTL), waarvan 12 kBD als synthetische kerosine. Gebaseerd op de in 2014 geplande productie in Maleisië, Qatar en Zuid-Afrika, werd geschat dat de wereldwijde productie van GTL-brandstof in 2017 circa 200 á 300 kBD zal zijn, waarvan tot een kwart (50 tot 75 kBD, ofwel 2.14-3.21 Tg (94-141 PJ)) aan vliegtuigbrandstof (Liu et al., 2013) (op basis van een dichtheid van GTL-kerosine van 738 kg/m$^3$ (Braun-Unkhoff & Riedel, 2015; Kick et al., 2012) en een specifieke energie van 44 MJ/kg). Dit komt overeen met 0.8-1.2% van de mondiale vliegtuigbrandstofconsumptie door de commerciële luchtvaart in 2017 (zie boven).
Ook methaan verkregen uit biogas (als hoofdcomponent) kan verwerkt worden tot een hernieuwbare (biogene) GTL-brandstof, maar vooralsnog bestaat er geen fabriek en staat er ook geen in de planning voor de nabije toekomst.
Wat betreft beschikbaarheid (van synthetische brandstoffen), bestaat vooralsnog alleen het FT-proces met steenkool of aardgas als feedstock op industriële schaal (Richter et al., 2018).

***Prognoses voor de toekomst***

Volgens Sajjad et al. (2014) geeft de recente opkomst van grootschalige GTL-plants aan dat er een toenemende vraag naar GTL-producten is. Figuur 12 geeft de historie en projectie weer van de wereldwijde GTL-productie vanaf 2005 tot 2040 volgens een referentiescenario van de U.S. Energy Information Administration (EIA, 2017).




*Figuur 12. Historie en projectie van de mondiale GTL-productie 2005-2040 volgens referentiescenario (overgenomen van EIA, 2017).*

De EIA (2017) schatte de mondiale productie van GTL-faciliteiten in 2017 rond 230 kBD, ofwel circa 0.2 % van de totale vloeistoffenproductie. Begin 2017 kwam meer dan 90% van deze GTL-productie uit 4 projecten: 2 in Qatar, 1 in Zuid-Afrika en 1 in Nigeria.

In Tabel *7* staan schattingen (voor 2017) van de mondiale GTL-kerosineproductie bij een kerosine-productieaandeel van 25 vol% (Liu et al., 2013) en 75 vol% (technisch maximaal haalbaar volgens Baliban et al. (2013)) van de geschatte mondiale GTL-productie. Deze productie is ook uitgedrukt als percentage van de mondiale vliegtuigbrandstofconsumptie door de commerciële luchtvaart in 2017 (zie boven).

Op basis van de projectie uit Figuur 12 van de mondiale GTL-productie voor 2040 (ca. 425 kBD), zijn ook schattingen gemaakt (voor 2040) van de mondiale GTL-kerosineproductie. Aangenomen wordt dat het kerosine-productieaandeel 25 vol% resp. 75 vol% van de totale geprojecteerde brandstofproductie bedraagt. Ook wordt het percentage hiervan gegeven ten opzichte van de geprojecteerde mondiale vliegtuigbrandstofconsumptie in 2040[1)] (Tabel *7*).

*Tabel 7. Schattingen en projecties van de mondiale GTL-kerosineproductie in 2017 en 2040.*

| Jaar | Bij 25% productieaandeel GTL | | | Bij 75% productieaandeel GTL | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | (Tg) | (PJ) | (%)* | (Tg) | (PJ) | (%)* |
| 2017 | 2.46 | 108 | 0.9 | 7.4 | 325 | 2.7 |
| 2040 | 4.55 | 200 | 0.7-1.0 | 13.7 | 600 | 2-3 |

*)Percentage van de mondiale vliegtuigbrandstofconsumptie in 2017 (ca. 273 Tg), resp. 2040 (630, resp. 440 Tg)[1)].

[1)]De mondiale vliegtuigbrandstofconsumptie in 2040 is, afhankelijk van het gekozen ACCRI-2050 (Aviation Climate Change Research Initiative) scenario, bepaald op ca. 630 Tg (2050-Base scenario), resp. 440 Tg (2050-S1 en 2050-S2 scenario's, beide uitgaande van 2% jaarlijkse verbetering van de brandstofefficiëntie tot 2050), op basis van interpolaties voor 2040 m.b.v. de historische waarden van 2006 (188 Tg; Brasseur et al. (2016)) en 2017 (273 Tg; Statista (2018)), en de geprojecteerde scenariowaarden voor 2050 (903 Tg, resp. 514 Tg; Brasseur et al. (2016)).

In haar International Energy Outlook 2017 (IEO2017) referentiescenario verwacht de EIA niet dat tot 2040 nog andere grootschalige GTL-fabrieken gebouwd of uitgebreid zullen worden. Veel eerder geplande uitbreidingen van bestaande faciliteiten zijn op 'hold' gezet en nieuwe uitbreidingen worden niet verwacht onder de voorziene marktcondities. De meeste nieuwe GTL-capaciteit zal afkomstig zijn van de conversie van Sasol's CTL-fabriek in Zuid-Afrika naar een GTL-faciliteit (verwacht in 2024). Ook wordt verwacht dat een eerder uitgestelde GTL-faciliteit in Oezbekistan tegen 2021 in de lucht komt.

Los van deze projecten verwacht de EIA dat de resterende groei in GTL-output afkomstig zal zijn van relatief kleine faciliteiten met een capaciteit van 5 kBD of minder. Die kleine GTL-faciliteiten kunnen modulair worden ingezet in aardgas producerende regio's met onvoldoende infrastructuur om aardgas te transporteren.

In haar hoge olieprijs-scenario verwacht de EIA een prikkelwerking van een veel hogere olieprijs om nieuwe GTL-fabrieken te bouwen of capaciteit uit te breiden van bestaande fabrieken. De mondiale GTL-productie zal dan blijven toenemen tussen 2025 en 2040. In haar lage olieprijs-scenario komt het Oezbekistan-project nog steeds online, maar zullen na 2021 geen andere projecten meer volgen.

## 4.6.3. Biokerosine

***Het tijdstip van invoering***

Biokerosine uit oliën en vetten volgens het HEFA-proces is een gevestigde techniek. FT-procédé's met biomassa als grondstof zijn nog in het ontwikkelingsstadium. De drie andere , door de ASTM al gecertificeerde, feedstock-proces combinaties zijn nog in het ontwikkelstadium.
Het 'RENJET-rapport' verwacht dat het drie tot vijf jaar kost voor de vier gecertificeerde, maar nog niet (geheel) commercieel beschikbare feedstock-procescombinaties commercieel worden (De Jong, Hoefnagels, et al., 2017).
Kieckhäfer et al. (2018) kiezen in hun modelmatige benadering als 'time to adjust capacity' 3.7 jaar (tussen het nemen van een besluit en de uitvoering van het besluit zit gemiddeld ongeveer 3,7 jaar).
Mawhood et al. (2016) kijken in een in 2015 geschreven artikel vooruit tot 2020 en zien tot op dat moment een onbekende, maar kleine RJF-productie.
J. Faber and Ahdour (2015) beschouwen in hun scenario's het tijdvak 2020-2030.

***Een realistisch haalbare schaal van invoering***

Er bestaan ambities en analyses. De begrippen zijn enigszins fluïde en lopen in elkaar over.
Van 2013 tot 2016 is het macro-beleid van de EU op biomassagebied vastgesteld (EC_EU, 2015). Dat maakt realistischer geschatte ambities voor 2030 mogelijk. Deze studie beperkt zich hier tot analyses en ambities, uitgesproken vanaf 2013. Voor oudere ambities, zie bijlage B4.

- In de Ecofys-studie Duurzame energie voor transport in Nederland (Hamelinck, Winkel, & Van den Bos, 2014) wordt alle biobrandstof gereserveerd voor de luchtvaart. Er is een grote rol voor algen. In

- Tabel *8* staat aangegeven voor 2010, 2030 en 2050 hoeveel PJ de gezamenlijke, in Nederland opstijgende passagiers nodig hebben, hoeveel PJ daarvan uit biokerosine kan komen, en hoeveel % het laatste van het eerste is.

*Tabel 8. Hoeveelheid PJ via biokerosine ten opzichte van de totale vraag aan opstijgende passagiers vanuit NL*

| jaar | PJ biokerosine | PJ opstijgende passagiers vanuit NL | % |
|---|---|---|---|
| 2010 | 0 | 81 | 0 |
| 2030 | 23 | 120 | 18 |
| 2050 | 39 | 120 | 32 |

- In Biofuels in a Global MBM for Aviation (J. Faber & Ahdour, 2015) noemen de auteurs percentages van 3 tot 6% marktaandeel van biokerosine in alle kerosine in 2030, afhankelijk van een voldoende gunstig gekozen scenario.
- In Renewable Jet Fuel in the EU – scenarios and preconditions for RJF towards 2030 (het 'RENJET- report') wordt gepleit voor 3.4Mton biokerosine in 2030, goed voor 129PJ, op schaal van de EU. (De Jong, Hoefnagels, et al., 2017)
- 'Overheidsmaatregelen biokerosine' van CE Delft bevat een scenario voor 40PJ en voor 80PJ in 2030 in Nederland (J. R. Faber, 2017)
- Het Actieplan Luchtvaart Nederland (Schiphol et al., 2018) wil dat er in Nederland in 2030 voor 25PJ aan biokerosine geproduceerd wordt
- Transport & Environment rekenen, op basis van alleen afval en residuen, met 285PJ in 2050 op EU-schaal (Murphy et al., 2018). Ze geven geen waarde voor 2030.
- Een recente, grondige analyse is "Renewable jet fuel supply scenarios in the EU in 2020-2030 in de context of proposed biofuel policy and competing biomass demand"(De Jong et al., 2018).
  De analyse gaat uit van een hoog en een laag aanbodscenario, en van een hoog en een laag vraagscenario. Import van biomassa blijft beperkt tot 10% of minder.
  De analyse is op zich op strikte non food-basis en laat biomassagebruik voor bestaande doelen, en voor bodemonderhoud en erosiebescherming, intact.

  Het toegepaste model RESolve-Biomass optimaliseert de systeemkosten over het geheel aan grondstoffen en eindproducten binnen het kader van de RED-II wetgeving en de geldende stimuleringsmaatregelen.
  In deze context kan 165 – 261PJ/jaar geproduceerd worden. Dit is 6 tot 9% van de 2800 a 2900PJ kerosineverbruik, zoals dat in 2030, bij ongewijzigde groei, in de EU verwacht wordt.

### 4.6.4. PTL-kerosine

***Stadium van ontwikkeling***

Tot op heden zijn er geen volledige PTL-kerosine brandstofpaden gedemonstreerd. PTL-systemen zijn wel in ontwikkeling in IJsland (Carbon_Recycling_International), Finland (Lut-University, 2017), Duitsland veel (sunfire.de, 2017) en Noorwegen (news.bio-based.eu, 2017).

Deze huidige fabrieken zijn belangrijk voor de ontwikkeling van technologieën/processtappen in de richting van industriële schaal van productiepaden.

Tabel 9 geeft een overzicht van de bestaande demonstratiefabrieken.

*Tabel 9. Bestaande demonstratie- en pilot-fabrieken voor Electrobrandstof in Europa (Patrick Schmidt et al., 2018).*

| Faciliteit/ operator naam | Land | Jaar start | Output elektro-brandstof | Elektriciteit verbruik | Productie resultaat | Conversie efficiëntie | $CO_2$ bron |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Audi | Duitsland | 2015 | H2 | 6.3 MW | 3.5 MW | 56% | Afvalwater biogas |
| BioCAT | Denemarken | 2016 | CH4 | 1 MW | 0.56 MW | 56% | Afvalwater biogas |
| CRI | IJsland | 2012 | Methanol | 6 MW | 10 ton/dag | - | Geothermische vloeibaar gas |
| Met$CO_2$ | Duitsland | Planning 2018 | Methanol | 1 MW | 1 ton/dag | - | Powerplant vloeibaar gas |

Beide PTL-routes (via Fischer-Tropsch en methanol) zijn bewezen technisch uitvoerbaar. Individuele processen op grote schaal zijn reeds geïmplementeerd. In de demonstratiefabriek Sunfire in Dresden, Duitsland, is momenteel voor de Fischer-Tropsch route een volledige systeemintegratie voor PTL in gebruik.

In Karlsruhe heeft het Karlsruher Institut für Technologie (KIT) de eerste 200 liter synthetische brandstof geproduceerd door middel van PTL met zonne-energie en $CO_2$ uit de lucht. Deze opstelling kan ook PTL-kerosine produceren .

Om te bepalen in welke fase de technische ontwikkeling is, heeft de Europese Commissie Technology Readiness Levels (TRL) ontwikkeld. TRL geven de mate van ontwikkeling van een technologie aan, waarbij TRL 1 staat voor technologie aan het begin van de ontwikkeling en TRL 9 voor technologie die technisch en commercieel gereed is.(Karlsruher_Institut_für_Technologie, 2017) P. Schmidt and Weindorf (2016) geven aan dat een groot aantal stappen in het productieproces een TRL hebben van 9. Er is ook een aantal productiestappen minder ver en die hebben een TRL van 6 (deze bevinden zich aan het eind van de ontwikkelingsfase). Stappen met een TRL van 6 zijn voor de $CO_2$ levering: absorptie/elektrodialyse en absorptie en desorptie (het weer losraken van een oppervlak). Voor de synthese is dit de omgekeerde water-gas verschuiving.

(Lehmann, 2018) van de German Environment Agency geeft aan dat voor zowel PTL via de Fischer-Tropsch-route als de methanol-route met geconcentreerde $CO_2$ bron, de TRL 8 à 9 zijn. Verder geeft Goede (2018) aan dat de directe luchtafvang van $CO_2$ momenteel wordt gecommercialiseerd.

Ontwikkeling in stappen van het productieproces heeft ook invloed op de kosten van PTL. Waar het voorheen € 520 koste om 1 ton $CO_2$ uit de lucht te halen, kost dit met een nieuw proces ongeveer tussen de 80 en 200 euro. Het proces maakt gebruik van een luchtcontractor, pelletreactor en calcinatie voor het opvangen, zuiveren en comprimeren van $CO_2$ (Keith, Holmes, St. Angelo, & Heidel, 2018).

De productie van vliegtuigbrandstof van FT-synthese is al aangetoond en goedgekeurd voor gebruik door ASTM. De straalbrandstofroute via methanol is echter niet aangetoond en nog niet gecertificeerd door ASTM voor gebruik op commerciële vluchten. Als de route via methanol zou worden gevolgd, zou technische goedkeuring een belangrijke stap zijn voordat de implementatie zou kunnen beginnen (Patrick Schmidt et al., 2018).

(Lehmann, 2018) geeft aan dat het niet waarschijnlijk is dat PTL in 2030 een grote rol zal hebben in de brandstoflevering. Goldmann et al. (2018) geven aan dat de technologische paraatheid van alle elektrochemische paden ver achter loopt, maar wel de potentie hebben om met hernieuwbare energie op maat gemaakte emissievrije vliegtuigbrandstoffen te produceren.

Vliegtuigen op batterijen zullen waarschijnlijk niet haalbaar zijn tegen 2050. Waterstof heeft een te lage energiedichtheid en wordt achtervolgd door veiligheidsproblemen. Biobrandstoffen zijn beperkt in de hoeveelheid te leveren brandstof. PTL kan kerosine leveren voor langeafstandstransport en grootschalige energieopslag mogelijk maken om de seizoensgebonden mismatch tussen vraag en aanbod van hernieuwbare elektriciteit te dekken. De conversietechnologie van water en $CO_2$ door elektrolyse is onlangs uitgebreid naar nieuwe plasmatechnologie. Voor $CO_2$-splitsing door plasmolyse is het verminderde elektrische veld geïdentificeerd als de belangrijkste parameter voor het verklaren en verbeteren van de energie-efficiëntie. Energie-efficiëntie door plasmolyse is vergelijkbaar met die van elektrolyse, maar biedt voordelen in energiedichtheid, opschaling en omschakeling in reactie op intermitterend vermogen zonder gebruik van schaarse materialen (Goede, 2018).

***Schaalgrootte***

De fysiek beperkende factor voor het toepassen van PTL op grote schaal is de ruimte die nodig is voor het opwekken van hernieuwbare energie. Om in 2050 50% van de benodigde vliegtuigbrandstof in Europa via PTL op te wekken is 3000 PJ nodig (Maling, 2017). Om dit op te wekken met windenergie is bijna 2x de oppervlakte van Nederland nodig. De Europese windenergie potentie is 44.000 – 110.000 PJ (Eurpean_Environment_Agency, 2009). Er lijkt dus voldoende potentie voor windenergie in Europa.

Echter, ook andere sectoren zullen $CO_2$-doelstellingen willen halen en een beroep doen op de potentiele windenergie locaties. Een andere mogelijkheid is om de energie buiten Europa op te wekken. Op de wereld zijn betere locaties om wind en zonne-energie op te wekken (Argentinië is een goede locatie). De energie (PTL) kan voor Europa getransporteerd worden naar de haven van Rotterdam (Fasihi, Bogdanov, & Breyer, 2016).

# 5. Discussie en conclusies

## 5.1. Discussie

Uit deze studie blijkt dat synthetische kerosine veel potentie heeft om, op de lange termijn (2050), op grote schaal te kunnen bijdragen aan de behoefte van vliegtuigbrandstof. Hoewel GTL, CTL en biokerosine een beperkte capaciteit aan kerosine kunnen leveren, kan wel van deze productieprocessen geleerd worden en kan deze kennis toegepast worden op het PTL-proces, dat wel op grote schaal kerosine kan leveren. De productie van biokerosine en PTL-kerosine is echter nog niet op grote schaal toegepast. Het is daarom lastig in te schatten wat de verdere ontwikkelingen gaan worden en waar tegen beperkingen wordt aangelopen. Voor biokerosine geldt dit overigens minder omdat alle productiestappen reeds doorlopen zijn.

De afgelopen jaren zijn er veel technische studies naar biokerosine en PTL uitgevoerd die aantonen dat een onderdeel van het productieproces efficiënter kan of dat zelfs een nieuwe productiestap kan worden geïntroduceerd. Dit stemt positief, maar de gebruikte studies voor het opstellen van voorliggend rapport hebben alle te maken gehad met de onzekere situatie waarin biokerosine en PTL nog niet op grote schaal zijn geproduceerd. Deze onzekerheden zijn overgenomen in dit rapport. Het advies is dan ook om de resultaten naar de toekomst toe niet te gedetailleerd te lezen maar op grote lijnen te gebruiken. De gebruikte gegevens voor fossiele vliegtuigbrandstoffen (conventionele, GTL- en CTL-kerosine) zijn wat dat betreft nauwkeuriger.

Deze studie geeft voor alle deelvragen, met de huidige kennis, een goed beeld wat de mogelijkheden zijn van GTL, CTL, biokerosine en PTL. Dit overzicht is nog niet eerder opgesteld.

Het voordeel van synthetische kerosine boven conventionele kerosine zit vooral in een schonere verbranding en een lagere uitstoot, die vooral op lokaal niveau van de leefomgeving van vliegvelden gunstig kan uitpakken. Biokerosine en PTL-kerosine hebben een klimaatvoordeel wat betreft de emissie van broeikasgassen. De volledige inzetbaarheid van GTL-, CTL-, bio- (en in de toekomst PTL-) kerosine wordt vooralsnog vooral beperkt door het gebrek (GTL) of tekort (CTL en BTL) aan aromaten. Voor de technologische problemen die door dit gebrek ontstaan, zijn oplossingen nodig. Te denken valt onder meer aan andere materialen (bijv. elastomeren) voor de vervaardiging van brandstofpakkingen. De status van het onderzoek hiernaar is niet meegenomen in deze studie.

Een alternatief materiaal zou dan een aanpassing vergen van de huidige vliegtuigbrandstofsystemen. De vraag of zo’n aanpassing rendabel is, gezien de hogere prijs en de beperkte beschikbaarheid van synthetische kerosine ten opzichte van conventionele kerosine, is verder niet onderzocht.

Een andere oplossing zou kunnen zijn om aromaten als additief toe te voegen aan of door bij te mengen met synthetische kerosine met een hoger aromaatgehalte (bijvoorbeeld FT-SKA), in plaats van met conventionele kerosine. Hierdoor kan de kerosine weliswaar volledig synthetisch worden gemaakt, maar blijft het nadeel van de aanwezigheid van aromaten voor wat betreft de emissie van toxische stoffen in stand. Verder onderzoek hiernaar is in deze studie niet meegenomen.

Omdat GTL- en CTL-kerosine (evenals conventionele kerosine) zijn gebaseerd op fossiele feedstock, dragen deze synthetische kerosinesoorten niet bij aan een vermindering van het gebruik hiervan. Vooral steenkool als grondstof komt bovendien steeds meer onder druk te staan vanwege de hoge $CO_2$-emissie bij het omzettingsproces.

Als mogelijk klimaatvoordeel is de verwachte afname van de vorming van contrails te noemen bij gebruik van deze synthetische kerosinesoorten (in blends met conventionele kerosine). Contrails zijn de strepen achter vliegtuigmotoren, die ontstaan doordat waterdamp bevriest. Roet werkt als ijsvormingskern en synthetische kerosine produceert minder roet door zijn lagere aromaatgehalte. Contrails dragen bij aan de netto opwarming van het klimaat op aarde (Brasseur et al., 2016).

Biokerosine en PTL-kerosine scoren wel goed qua broeikasemissies. Bij de productie van PTL moet dan wel alleen gebruik worden gemaakt van hernieuwbare energie (wind of zon). Het fabriceren van PTL kost namelijk relatief veel energie. De gebruikte $CO_2$-bron zal uiteindelijk alleen uit de lucht gehaald moeten worden. Om synthetische kerosine door te kunnen laten groeien tot een volwaardig alternatief voor conventionele kerosine, is het belangrijk dat de technologische ontwikkeling van het productieproces doorgaat. Het hergebruik van een geconcentreerde $CO_2$-bron van fossiele oorsprong, zoals dat van Tata Steel in IJmuiden, kan er voor zorgen dat technieken zich verder ontwikkelen.

De kosten van synthetische kerosine zijn hoger dan van conventionele kerosine. De meerprijs zal naar alle waarschijnlijkheid kleiner worden, maar niet nul. De ontwikkeling van zowel de elektriciteitsprijs als de prijs van ruwe olie tot 2050 is grillig en lastig te voorspellen. Een andere onzekerheid is de ontwikkeling van beleid (zowel landelijk, Europees als mondiaal). Wanneer door overheden echt werk wordt gemaakt van een meer duurzame energievoorziening en gestuurd wordt door middel van subsidies of/en $CO_2$ belasting, kan, voor de lange termijn, synthetische kerosine zorgen voor de opvulling van een grote deel van de kerosinebehoefte. Dit zal waarschijnlijk een combinatie zijn van biokerosine en PTL-kerosine.

Omdat er momenteel nog niet echt een ander alternatief is voor duurzame vliegtuigbrandstof (er wordt wel geëxperimenteerd met elektrisch vliegtuigen), zijn bio- en PTL-kerosine goede alternatieven voor fossiele vliegtuigbrandstof. Naast maatrelen van de overheid zullen er ook stappen gezet moeten worden in de verdere ontwikkeling van nieuwe productieprocessen die de economische haalbaarheid vergroten.

Als het gaat om biokerosine is en blijft er discussie over landgebruik. Aan de rand van RED II en de ILUC-richtlijn ligt een grijze zone die ruimte laat voor interpretaties, bijvoorbeeld over het beheer van de Europese bossen. De recente studie "Multi-functionality and Sustainability in the European Union's Forests" (EASAC, 2017) in opdracht van de EU lijkt bijvoorbeeld behoedzamer over het aanplanten van Short Rotation Crops (SRC's) te spreken dan gebeurt in de schattingen van De Jong et al. (2018). SRC's zijn bijvoorbeeld gewassen als wilg en populier of miscanthus, die geteeld worden om in de behoefte aan lignocellulosegewassen t.b.v. biobrandstof te voorzien.

De EASAC kijkt bijvoorbeeld ook naar biodiversiteit en duurzaam bodembeheer. Ook De Jong et al. (2018) bouwen op eerder werk waarin een reservering ingeruimd is voor bodembeheer.
Maar omdat de EASAC niet met zoveel woorden ingaat op het werk van De Jong et al., en omgekeerd De Jong et al. niet ingaat op het EASAC-rapport, is het moeilijk in te schatten hoe de twee documenten zich onderling verhouden.

Naast een discussie over land is er een discussie over hulpbronnen als water, kunstmest en bestrijdingsmiddelen en de effecten daarvan.
Energiegewassen zijn erop geselecteerd met weinig externe ondersteuning te kunnen groeien (weinig water, mest en bestrijdingsmiddelen). Geheel buiten deze hulpbronnen kan echter op de lange duur geen enkel gewas. Daar staat tegenover dat traditionele voedingsgewassen vaak veel meer

hulpbronnen vragen dan energiegewassen, en ook hun stempel op milieu en landschap zetten.
De discussie is niet zwart-wit.
De afwegingen rond bosbeheer, landgebruik en hulpbronneninzet zijn politiek van aard en kunnen alleen in een groter kader gemaakt worden. Dat gaat het bereik van deze literatuurstudie te boven.
Op het moment dat een land of groep van landen een groter aandeel biokerosine wil opbouwen dan waar dat land of de landengroep zelf de grondstoffen voor heeft, gaan er zich materiaalstromen als handelsgoederen over de aarde bewegen en ontstaan er verdelingsvraagstukken.
Het sectorplan van de Nederlandse luchtvaart (Schiphol et al., 2018) bijvoorbeeld wil naar 25PJ biokerosine in 2030 toe (goed voor 14% bijmenging). Dat is veel meer dan Nederland op eigen kracht kan waarmaken, en een hoger percentage dan dat waartoe de EU als geheel in staat is. Nederland kent zichzelf hier een voorhoedefunctie toe. De vraag is of dat op termijn houdbaar is.

De meest fundamentele onzekerheid is het gegeven dat het lage rendement van de fotosynthese een natuurlijk maximum oplegt aan de energie die per hectare geoogst kan worden. Mocht er ooit een genetisch gemodificeerd gewas komen met een verhoogde opbrengst, en mocht het landbouwsysteem goed overweg kunnen met dit nieuwe gewas, dan is er sprake van een ander verhaal.

Voor de productie van PTL-brandstof is relatief weinig water en grond nodig. Voor productie op grote schaal is wel een aanzienlijke hoeveelheid ruimte nodig voor de opwekking van zonne- of/en windenergie. Afhankelijk van de locatie van fabricering kan lokaal wel een watertekort ontstaan. De invloed van de productie van PTL-brandstof op de voedselproductie is beperkt doordat er geen akkerland voor nodig is. Wanneer bijvoorbeeld windenergie wordt gebruikt voor de productie van PTL kan dit samengaan met grond voor voedselproductie (of een andere landfunctie). Voor grootschalige opwekking van energie door zonne-energie parken, kan gekozen worden voor locaties die niet geschikt zijn voor voedselproductie (of andere landfuncties) zoals woestijngebied.

Tot slot: in dit onderzoek is enkel naar separate productielijnen gekeken. Er zijn ook samengestelde productielijnen denkbaar die hybride vliegtuigbrandstofcombinaties opleveren met synergetische eigenschappen. Volgens Floudas et al. (2012) kunnen op die manier de voordelen van GTL- en CTL-brandstoffen (hogere energiedichtheid) en van Biomass-to-Liquid (BTL) brandstoffen (lagere broeikasgasemissies) ten opzichte van conventionele brandstoffen benut worden. De TEA (Techno-economic and Ecological Assessment), uitgevoerd door DLR (German Aerospace Centre), laat zien dat een combinatie van biokerosine en PTL-kerosine voordelen kan opleveren ten opzichte van separate productielijnen.

## 5.2. Conclusies

De onderzoeksvraag van dit deelonderzoek is: wat zijn de milieu-, klimaat-, financiële, infrastructurele en technologische gevolgen van productie en gebruik van synthetische kerosine? Hieronder staan de conclusies van de verschillende deelvragen.

Ad deelvraag 1 en 2.
Synthetische kerosine heeft ten opzichte van conventionele kerosine onmiskenbaar voordelen voor de luchtkwaliteit in de omgeving van vliegvelden. De afwezigheid van zwavel en (als regel) aromaten in synthetische kerosine leidt tot lagere emissies van ultrafijnstof en roet.
Ad vraag 3.
Biokerosine en Power-to-Liquid kerosine hebben ten opzichte van conventionele kerosine onmiskenbaar voordelen voor het klimaat. De Life Cycle emissie van broeikasgassen is (veel) lager. Die van Gas-to-Liquid en Coal-to-Liquid kerosine liggen juist (iets) hoger dan conventionele kerosine.
Ad vraag 4.
Alle synthetische kerosinesoorten zijn duurder dan conventionele kerosine. Gas-to-Liquid en Coal-to-Liquid kerosine zijn ongeveer 25% duurder, biokerosine ongeveer 2 tot 4 keer zo duur en Power-to-Liquid kerosine ongeveer 6 keer zo duur. De meerprijs zal naar alle waarschijnlijkheid kleiner worden, maar niet nul.
Ad vraag 5a en 5b.
Momenteel is het niet mogelijk volledig op synthetische kerosine te vliegen; dit vereist andere brandstofpakkingen. De gevolgen van synthetische kerosine voor vliegtuigen zijn bij de gegeven bijmengregels afwezig.
De gevolgen van synthetische kerosine voor de infrastructuur en het beheer van vliegvelden zijn gering en oplosbaar, of zelfs afwezig.
Ad vraag 5c en 5d.
Problemen met de voedselproductie kunnen vooral ontstaan bij biokerosine. De Europese regelgeving en de zelfregulatie van de sector hebben het risico op ongewenst landgebruik en op schade aan de voedselproductie verkleind, maar niet tot nul. Bovendien moeten gemaakte afspraken gehandhaafd worden. Voor productie van PTL-kerosine op grote schaal (wat theoretisch mogelijk is) is wel een aanzienlijke hoeveelheid land nodig voor de opwekking van zonne- en/of windenergie.
Ad vraag 6.
Er is en blijft duidelijk te weinig biokerosine om alleen daarmee de luchtvaartgebonden vraagstukken van milieu en klimaat op te lossen. De meest recente analyse komt op een aannemelijke manier tot de conclusie dat biokerosine in de EU in 2030 goed is voor maximaal 9% van de benodigde brandstof. Het geschatte aandeel van GTL-kerosine in 2040 is maximaal ca. 3% van de mondiale vliegtuig-brandstofconsumptie door de commerciële luchtvaart. Power-to-liquid heeft wel de potentie om op lange termijn de luchtvaart te kunnen voorzien van voldoende synthetische kerosine. PTL staat echter nog aan het begin van de technische ontwikkeling.

Eindconclusie is dat de onderzochte synthetische kerosinesoorten schoner verbranden en minder toxische stoffen uitstoten. Dit kan vooral op lokaal niveau van de omgeving van vliegvelden gunstig uitpakken. Biokerosine en Power-to-Liquid kerosine zijn meer ‘duurzame‘ vormen van synthetische kerosine dan Gas-to-Liquid en Coal-to-Liquid kerosine die gebaseerd zijn op fossiele brandstoffen. Om van synthetische kerosine een succes te maken, zullen overheden de randvoorwaarden (waaronder financiële) moeten scheppen waarin synthetische kerosine zich, op de lange termijn (2050), kan ontwikkelen tot volwaardig alternatief voor conventionele kerosine.

# 6. Aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden eerst de algemene wetenschappelijke aanbevelingen gegeven en vervolgens de aanbevelingen geënt op de invloedcirkel en mogelijkheden van de opdrachtgever BVM2.

## 6.1. Algemene wetenschappelijke aanbevelingen

Gezien de voordelen ten opzichte van conventionele kerosine bevelen we aan om verder in kaart te brengen wat de beperkende factoren zijn voor een ruimere beschikbaarheid en ingebruikname van synthetische kerosine.

Ten behoeve van een ruimere beschikbaarheid bevelen we aan vervolgonderzoek uit te voeren naar het onderling mengen van synthetische kerosinesoorten.

Een belangrijke beperkende factor om over te stappen op volledig gebruik van biokerosine is de geringe beschikbaarheid door landgebrek en het gebrek aan bruikbaar afval als grondstof (§4.5.2). Er is onderzoek nodig naar de omvang van het mogelijke grondgebruik en de verdeling daarvan over de verschillende maatschappelijke functies.

PTL-kerosine heeft in principe een grote potentie. Maar dat vraagt om grote hoeveelheden duurzame elektriciteit en dat vraagt weer om grote oppervlakten en opslagvolumes (§4.5.3). Het onderzoek naar gebruik van afgas van TATA Steel ten behoeve van PTL-productie voor Schiphol is hiervan een voorbeeld. Er is verder onderzoek nodig naar hoe dergelijke oppervlakten en volumes in Nederland en Europa ingepast kunnen worden.

De invloed van aromaten, van nature aanwezig in conventionele kerosine, op de zweleigenschappen van afdichtingen van vliegtuigbrandstofsystemen staan ingebruikname van synthetische kerosine zonder bijmenging en zonder vliegtuigaanpassingen in de weg (§4.4.1.2**Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**). Er is al onderzoek uitgevoerd met als resultaat een mogelijk route hier naar toe, maar verder onderzoek naar meer opties is nog nodig. We bevelen daarom aan om onderzoek naar het effect van andere verbindingen op de zweleigenschappen van afdichtingen van vliegtuigbrandstofsystemen verder voort te zetten.

## 6.2. Aanbevelingen voor BVM2

We bevelen BVM2 aan om zich sterk te maken voor de ingebruikname van biokerosinemengsels op Eindhoven Airport, eventueel aangevuld met GTL-kerosine indien beschikbaar. De implementatie van GTL- en biokerosine op vliegveld Eindhoven vergt weinig of geen aanpassingen of onderzoek en kan technisch gesproken onmiddellijk plaatsvinden.

We bevelen BVM2 aan om de wijze waarop de meerkosten van de synthetische kerosinemengsels verrekend worden in te brengen in de discussies rond de toekomst van het vliegveld.

Zowel GTL- als biokerosine zijn momenteel slechts zeer beperkt beschikbaar. Een ruimere voorraad kan ontwikkeld worden, maar dat vraagt om beleid dat gericht is op opschaling. We bevelen BVM2 aan om dergelijk beleid te steunen. Ondanks deze opschaling blijft het aanbod achter bij de vraag.

GTL- en biokerosine zijn een goede beginoplossing, maar te beperkt om een goede eindoplossing te kunnen zijn. We bevelen BVM2 dus aan om zich niet blind te staren op deze twee technieken.

Op de langere termijn zou PTL-kerosine het gat tussen aanbod en vraag naar synthetische kerosine kleiner kunnen maken. We bevelen BVM2 aan om zich positief over onderzoek op dit gebied uit te spreken.

# Literatuur

Al-Nuaimi, I. A., Bohra, M., Selam, M., Choudhury, H. A., El-Halwagi, M. M., & Elbashir, N. O. (2016). Optimization of the Aromatic/Paraffinic Composition of Synthetic Jet Fuels. *Chemical Engineering & Technology, 39*(12), 2217-2228. doi:10.1002/ceat.201500513

Baliban, R. C., Elia, J. A., & Floudas, C. A. (2013). Novel Natural Gas to Liquids Processes: Process Synthesis and Global Optimization Strategies. *AIChE Journal, 59*(2), 505-531. doi:10.1002/aic.13996

Beyersdorf, A. J., Timko, M. T., Ziemba, L. D., Bulzan, D., Corporan, E., Herndon, S. C., & al., e. (2014). Reductions in aircraft particulate emissions due to the use of Fischer-Tropsch fuels. *Atmospheric Chemistry and Physics*(14), 11-23. doi:10.5194/acp-14-11-2014

Blakey, S., Rye, L., & Wilson, C. W. (2011). Aviation gas turbine alternative fuels: A review. *Proceedings of the Combustion Institute, 33*, 2863-2885. doi:10.1016/j.proci.2010.09.011

Boland, A., Cherry, M. G., & Dickson, R. (2017). *Doing a systematic review.* London: SAGE Publications Ltd.

Bracker, J. (2017). *An outline of sustainability criteria for synthetic fuels used in transport.* . Retrieved from https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Sustainability-criteria-for-synthetic-fuels.pdf

Brasseur, G. P., Gupta, M., Anderson, B. E., Balasubramanian, S., Barrett, S., Duda, D., . . . Zhou, C. (2016). Impact of aviation on climate: FAA's Aviation Climate Change Research Initiative (ACCRI) Phase II. *BULLETIN OF THE AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, 97*(4), 561-583. doi:10.1175/BAMS-D-13-00089.1

Braun-Unkhoff, M., & Riedel, U. (2015). Alternative fuels in aviation. *CEAS Aeronautical Journal, 6*(1), 83-93. doi:10.1007/s13272-014-0131-2

Braun-Unkhoff, M., Riedel, U., & Wahl, C. (2016). About the emissions of alternative jet fuels. *CEAS Aeronautical Journal, 8*, 167-180. doi:DOI 10.1007/s13272-016-0230-3

Brem, B. T., Durdina, L., Siegerist, F., Beyerle, P., Bruderer, K., Rindlisbacher, T., & al., e. (2015). Effects of Fuel Aromatic Content on nonvolatile particulate emissions of an in-production aircraft gas turbine. *Environmental Science and Technology, 49*, 13149-13157. doi:10.1021/acs.est.5b04167

Brunelle-Yeung, E., Masek, T., Rojo, J. J., Levy, J. I., Arunachalam, S., Miller, S. M., . . . Waitz, I. A. (2014). Assessing the impact of aviation environmental policies on public health. *Transport Policy, 34*, 21-28. doi:10.1016/j.tranpol.2014.02.015

Brynolf, S., Taljegard, M., Grahn, M., & Hansson, J. (2017). Electrofuels for the transport sector: A review of production costs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, July 2016*, 1-11. doi:representhttp://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.288

Carbon_Recycling_International. George Olah CO2 to Renewable Methanol Plant, Reykjanes. Retrieved from www.chemicals-technology.com/projects/george-olah-renewable-methanol-plant-iceland/

CBS. (2018). Brandstofverbruik lucht- en scheepvaart. Retrieved from https://www.cbs.nl/nl-nl/maatschappij/verkeer-en-vervoer/transport-en-mobiliteit/energie-milieu/energieverbruik-van-vervoermiddelen/categorie-energieverbruik/brandstofverbruik-lucht-en-scheepvaart

Chiaramonti, D., Prussi, M., Buffi, M., & Tacconi, D. (2014). Sustainable bio kerosine: Process routes and industrial demonstration activities in aviation biofuels. *Applied Energy*(136), 767-774. doi:10.1016/j.apenergy.2014.08.065

Christie, S., Lobo, P., Lee, D. S., & Raper, D. (2016). Gas Turbine Engine Nonvolatile Particulate Matter Mass Emissions: Correlation with Smoke Number for Conventional and Alternative Fuel Blends. *Environmental Science and Technology, 51 (2)* 988–996. doi:10.1021/acs.est.6b03766

Cortez, L. A. B. (2013). *Flightpath to aviation fuels in Brazil: action plan*. Retrieved from www.fapesp.br/publicacoes/flightpath-to-aviation-biofuels-in-brazil-action-plan.pdf

Das, D. D., McEnally, C. S., Kwan, T. A., Zimmerman, J. B., Cannella, W. J., Mueller, C. J., & Pfefferle, L. D. (2017). Sooting tendencies of diesel fuels, jet fuels, and their surrogates in diffusion flames. *Fuel, 197*, 445-458. doi:10.1016/j.fuel.2017.01.099

De Jong, S., Antonissen, K., Hoefnagels, R., Lonza, L., Wang, M., Faaij, A., & Junginger, M. (2017). Life-cycle analysis of greenhouse gas emissions from renewable jet fuel production. *Biotechnology for Biofuels*. doi:DOI 10.1186/s13068-017-0739-7

De Jong, S., Hoefnagels, R., Van Stralen, J., Londo, M., Slade, R., Faaij, A., & Junginger, M. (2017). *Renewable Jet Fuel in the European Union - Scenarios and Preconditions for Renewable Jet*

*Fuel Deployment towards 2030*. Retrieved from https://dspace.library.uu.nl/handle/1874/352706

De Jong, S., Van Stralen, J., Londo, M., Hoefnagels, R., Faaij, A., & Junginger, M. (2018). Renewable jet fuel supply scenarios in the European Union in 2012-2030 in the context of proposed biofuel policy and competing biomass demand. *Wiley GCB bioenergy*, 1-22. doi:10.1111/gcbb.12525

Deane, J. P., & Pye, S. (2018). Europe's ambition for biofuels in aviation - a strategic review of challenges and opportunities. *Energy Strategy Reviews*(20), 1-5. doi:10.1016/j.esr.2017.12.008

Dimitriou, I., García-Gutiérrez, P., Elder, R. H., Cuéllar-Franca, R. M., Azapagic, A., & Allen, R. W. K. (2015). Carbon dioxide utilisation for production of transport fuels: process and economic analysis. *Energy & Environmental Science, 8(6)*, 1775-1789. doi:10.1039/C4EE04117H

EASAC. (2017). *Multi-functionality and sustainability in the European Union's forests*. Retrieved from https://www.easac.eu/

EC_EU. (2015). Biofuels for aviation Retrieved from https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy/biofuels/biofuels-aviation

Edwards, R., Hass, H., Lavivé, J.-F., Lonza, L., Mass, H., Rickeard, D., & Weindorf, W. (2013). *Well-to-wheel analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context Well-To-Tank (WTT)*. Retrieved from https://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/sites/about-jec/files/documents/report_2013/wtt_report_v4_july_2013_final.pdf

EIA. (2017). Global gas-to-liquids growth is dominated by two projects in South Africa and Uzbekistan. *International Energy Outlook 2017.* Retrieved from https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=33192

Eisentraut, A. e., Brown, A., & Fulton, L. (2011). *Technology Roadmap Biofuels for Transport*. Retrieved from Paris, France: www.iea.org

Eurostat. (2018). Kerosineverkoop in de 28 EU landen door de jaren heen. Retrieved from https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do;jsessionid=2PP3PnzEXS7uQyzOPg0EfW_FjcBuy6ihXzsTgow_GksTVPnV3-TA!1742705336?tab=table&plugin=1&pcode=ten00095&language=en

Eurpean_Environment_Agency. (2009). Europe's onshore and offshore wind energy potential.

ExxonMobil. Methanol to gasoline synthesis. Retrieved from www.exxonmobilchemical.com/en/products-and-services/technology-licensing-and-services/methanol-to-gasoline-synthesis

FAA. (2016). New Alternative Jet Fuel Approved.

FAA. (2018). *FAA Aerospace Forecast. Fiscal Years 2018-2038*. Retrieved from

Faber, J., & Ahdour, S. (2015). *Biofuels in a Global MBM for Aviation*. Retrieved from Delft: www.cedelft.eu

Faber, J. R. (2017). *Overheidsmaatregelen biokerosine* (17.4J81.35). Retrieved from Delft: www.ce.nl

Fasihi, M., Bogdanov, D., & Breyer, C. (2016). Techno-Economic Assessment of Power-to-Liquids (PtL) Fuels Production and Global Trading Based on Hybrid PV-Wind Power Plants. *Energy Procedia, 99*, 243-268. doi:https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.115

Floudas, C. A., Elia, J. A., & Baliban, R. C. (2012). Hybrid and single feedstock energy processes for liquid transportation fuels: A critical review. *Computers and Chemical Engineering, 41*, 24-51. doi:10.1016/j.compchemeng.2012.02.008

Gezondheidsraad, e. (2018). *Gezondheidswinst door schonere lucht* (Nr. 2018/01). Retrieved from www.gezondheidsraad.nl

Goede, A. P. H. J. E. W. C. (2018). CO2 neutral fuels. *189*, 00010.

Goldmann, A., Sauter, W., Oettinger, M., Kluge, T., Schröder, U., Seume, J., . . . Dinkelacker, F. (2018). A Study on Electrofuels in Aviation. *Energies, 11(2):392*.

Hamelinck, C., Winkel, R., & Van den Bos, a. (2014). *Duurzame energie voor transport in Nederland*. Retrieved from www.natuurenmilieu.nl/wp-content/uploads/2015/08/nm_rapport_duurzame_brandstoffen_v2.pdf

Hemighaus, G., Boval, T., Bacha, J., Barnes, F., Franklin, M., Gibbs, L., . . . Morris, J. (2006). *Aviation Fuels Technical Review (Chevron)*. Retrieved from www.cgabusinessdesk.com/document/aviation_tech_review.pdf

Hyne, N. J. (2012). *Nontechnical guide to petroleum geology, exploration, drilling and production*. Tulsa, USA: PennWell Corporation.

IATA. (2015). *IATA Guidance Material for Sustainable Aviation Fuel Management*. Retrieved from https://www.iata.org/whatwedo/environment/Documents/IATA%20Guidance%20Material%20for%20SAF.pdf

IATA_Jet_Fuel_price_monitor. (2018). Platts jet fuel price index. Retrieved from www.iata.org/publications/economics/fuel-monitor/Pages/index.aspx

ICAO_Environment_branch. (2016). ICAO Environmental Report 2016 - On board a sustainable future. Retrieved from www.icao.int/environmental-protection/Pages/env2016.aspx

IPCC. (1999). *Aviation and the Global Atmosphere. Summary for Policymakers.* Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/av-en-1.pdf

Janic, M. (2018). An assessment of the potential of alternative fuels for "greening" commercial air transportation. *JOURNAL OF AIR TRANSPORT MANAGEMENT, 69*, 235-247. doi:10.1016/j.jairtraman.2017.09.002

Jovanović, A. S., Klimek, P., & Quintero, F. A. (2015). Forecast for the use of alternative fuels in aviation under environmental constraints and volatile market conditions. *Environment Systems and Decisions, 35*(4), 521-531. doi:10.1007/s10669-015-9573-2

Kapadia, Z. Z., Spracklen, D. V., Arnold, S. R., Borman, D. J., Mann, G. W., Pringle, K. J., . . . Yoshioka, M. (2016). Impacts of aviation fuel sulfur content on climate and human health. *Atmospheric Chemistry and Physics, 16*(16), 10521-10541. doi:10.5194/acp-16-10521-2016

Karlsruher_Institut_für_Technologie. (2017). Power-to-liquid: 200 liters of fuel from solar power and the air's carbon dioxide. Retrieved from https://www.sciencedaily.com/releases/2017/08/170808182423.htm

Keith, D. W., Holmes, G., St. Angelo, D., & Heidel, K. (2018). A Process for Capturing CO<sub>2</sub> from the Atmosphere. *Joule, 2*(8), 1573-1594. doi:10.1016/j.joule.2018.05.006

Khalek, A. (2016). *Effect of Jet Fuel Properties on solid Particle Number and Mass Emission from Aircraft Gas Turbine Engine: Development of a Jet Fuel Particle Index*. Paper presented at the 20th ETH Conference on Combustion Generated Particles, Zürich, Switzerland.

Kick, T., Herbst, J., Kathrotia, T., Marquetand, J., Braun-Unkhoff, M., Naumann, C., & Riedel, U. (2012). An experimental and modeling study of burning velocities of possible future synthetic jet fuels. *Energy, 43*(1), 111-123. doi:10.1016/j.energy.2012.01.035

Kieckhäfer, K., Quante, G., Müller, C., Spengler, T. S., Lossau, M., & Jonas, W. (2018). Simulation-Based Analysis of the Potential of Alternative Fuels towards Reducing $CO_2$ - Emissions from Aviation. *energies*(11, 186). doi:10.3390/en11010186

King, C. W., & Webber, M. E. (2008). Water Intensity of Transportation. *Environ Sci Technol, 42*(21), 7866-7872. doi:10.1021/es800367m

König , D., Baucks, N., Dietrich, R., & Wörner, A. (2015). Simulation and evaluation of a process concept for the generation of synthetic fuel from CO2 and H2. *Energy, 91*. doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.099

Lee, D. S., Fahey, D. W., Forster, P. M., Newton, P. J., Wit, R. C. N., Lim, L. L., . . . Sausen, R. (2009). Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric Environment, 43*(22-23), 3520-3537. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.04.024

Lee, D. S., Pitari, G., Grewe, V., Gierens, K., Penner, J. E., Petzold, A., . . . Sausen, R. (2010). Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation. *Atmospheric Environment, 44*(37), 4678-4734. doi:https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.06.005

Lehmann, H. (2018). *Power to liquids potentials and perspectives.* Paper presented at the T&E Workshop "Decarbonization of Aviation". https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/Power-to-Liquids%2C%20Potentials%20and%20Perspectives_Dr.%20Harry%20Lehmann.pdf

Li, H., Altaher, M. A., Wilson, C. W., Blakey, S., Chung, W., & Rye, L. (2014). Quantification of aldehydes emissions from alternative and renewable aviation fuels using a gas turbine engine. *Atmospheric Environment, 84 (2014)*, 373-379. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.11.058

Liu, G., Yan, B., & Chen, G. (2013). Technical Review on jet fuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 25*, 59-70. doi:10.1016/j.rser.2013.03.025

Lut-University. (2017). Finnish demo plant produces renewable fuel from carbon dioxide captured from the air.

Maling, C. (2017). *What role is there for electrofuel technologies in European transport's low carbon future?* . Retrieved from https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2017_11_Cerulogy_study_What_role_electrofuels_final_0.pdf

Mawhood, R., Gazis, E., De Jong, S., Hoefnagels, R., & Slade, R. (2016). Production Pathways for renewable jet fuel: a review of commercialisation status and future prospects. *Biofpr Biofuels, Bioproducts and Biorefinig), 10: 462-484 (2016)*. doi:https://doi.org/10.1002/bbb.1644

Moore, R. H., Thornhill, K. L., Weinzierl, B., Sauer, D., D'Ascoli, E., Kim, J., & etal. (2017). Biofuel blending reduces particle emissions from aircraft engines at cruise conditions. *Nature, 543*. doi:doi:10.1038/nature21420

Morita, H., Yang, S., Unger, N., & Kinney, P. L. (2014). Global health impacts of future aviation emissions under alternative control scenarios. *Environ Sci Technol, 48*(24), 14659-14667. doi:10.1021/es5055379

Murphy, A., Hemmings, B., Calvo Ambel, C., Buffet, L., Gilliam, L., Sihvonen, J., & Earl, T. (2018). *Roadmap to decarbonising European aviation*. Retrieved from www.transportenvironment.org

Neuling, U., & Kaltschmitt, M. (2018). Techno-economic and environmental analysis of aviation biofuels. *Fuel Processing Technology, 171*, 54-69. doi:10.1016/j.fuproc.2017.09.022

news.bio-based.eu. (2017). Erste kommerzielle Blue Crude-Production entsteht in Norwegen.

Platform-Duurzame-Brandstoffen. (2018). wijziging-wet-milieubeheer-voor-implementatie-iluc-richtlijn-in-staatsblad-gepubliceerd. Retrieved from https://platformduurzamebiobrandstoffen.nl/wijziging-wet-milieubeheer-voor-implementatie-iluc-richtlijn-in-staatsblad-gepubliceerd/

Quintel. (2018). *carbonneutral aviation with current engine technology: the take-of synthetic kerosene production in the Netherlands* Retrieved from

Richter, S., Braun-Unkhoff, M., Naumann, C., & Riedel, U. (2018). Paths to alternative fuels for aviation. *CEAS Aeronautical Journal, 9*(3), 389-403. doi:10.1007/s13272-018-0296-1

Romanczyk, M., Ramirez Velasco, J. H., Xu, L., Vozka, P., Dissanayake, P., Wehde, K. E., . . . Kenttämaa, H. (2019). The capability of organic compounds to swell acrylonitrile butadiene O-rings and their effects on O-ring mechanical properties. *Fuel, 238*, 483-492. doi:10.1016/j.fuel.2018.10.103

RSB. (2018). A Guide to the RSB Standard. Retrieved from http://rsb.org/the-rsb-standard/

Sajjad, H., Masjuki, H. H., Varman, M., Kalam, M. A., Arbab, M. I., Imtenan, S., & Rahman, S. M. A. (2014). Engine combustion, performance and emission characteristics of gas to liquid (GTL) fuels and its blends with diesel and bio-diesel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 30*, 961-986. doi:10.1016/j.rser.2013.11.039

Schiphol, KLM, luchtvaartmaatschappijen, a., VNO-NCW, Spoorwegen, N., & Delft, T. (2018). *Actieplan luchtvaart Nederland voor 35% minder $CO_2$ in 2030*. Retrieved from www.tudelft.nl/2018/lr/luchtvaartsector-overhandigt-actieplan-slim-en-duurzaam-aan-minister-iw/

Schmidt, P., Batteiger, V., Roth, A., Weindorf, W., & Raksha, T. (2018). Power-to-Liquids as Renewable Fuel Option for Aviation: A Review. *Chemie Ingenieur Technik, 90*(1-2), 127-140. doi:10.1002/cite.201700129

Schmidt, P., & Weindorf, W. (2016). *Power-to-Liquids Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel*. Retrieved from http://www.lbst.de/news/2016_docs/161005_uba_hintergrund_ptl_barrierrefrei.pdf

Schmidt, P., Zittel, W., Weindorf, W., & Raksha, T. (2016). *Renewables in Transport 2050 – Empowering a sustainable mobility future with zero emission fuels from renewable electricity*. Retrieved from Frankfurt: www.lbst.de/news/2016_docs/FVV_H1086_Renewables-in-Transport-2050-Kraftstoffstudie_II.pdf

Schulz, E. (2018). Global Networks, Global Citizens. Global Market Forecast 2018-2037. In Airbus (Ed.). Blagnac Cedex, France.

Speight, J. G. (2001). *Handbook of petroleum analysis*: John Wiley & Sons.

Staples, M. D., Malina, R., Suresh, P., Hileman, J. I., & Barrett, S. R. H. (2018). Aviation CO2 emissions reductions from the use of alternative jet fuels. *Energy Policy, 114*, 342-354. doi:10.1016/j.enpol.2017.12.007

Starik, A. M. (2007). Gaseous and particulate emissions with jet engine exhaust ans atmospheric pollution. In *Educational Notes RTO-EN-AVT-150* (Vol. 15, pp. 15-11 tot 15-22). Neuilly sur Seine (Frankrijk): NATO Research and Technology Organisation.

Statista. (2018). Total fuel consumption of commercial airlines worldwide between 2005 and 2018. Retrieved from https://www.statista.com/statistics/655057/fuel-consumption-of-airlines-worldwide/

Stratton, R. W., Wong, H. M., & Hileman, J. I. (2010). *Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Alternative Jet Fuels*. Retrieved from http://web.mit.edu/aeroastro/partner/reports/proj28/partner-proj28-2010-001.pdf

sunfire.de. (2017). blue-crude-sunfire-produziert-nachhaltigen-erdoelersatz. https://www.sunfire.de/de/unternehmen/news/detail/blue-crude-sunfire-produziert-nachhaltigen-erdoelersatz

Tabak, A. A., Avidan, A. A., & Krambeck, F. J. (1986). *PRODUCTlON OF SYNTHETIC GASOLINE AND DIESEL FUEL FROM NON-PETROLEUM RESOURCES*. Retrieved from https://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/31_2_NEW%20YORK_04-86_0293.pdf

Vallentin, D. (2008). Policy drivers and barriers for coal-to-liquids (CtL) technologies in the United States. *Energy Policy, 36*(8), 3198-3211. doi:10.1016/j.enpol.2008.04.032

Wang, W.-C., & Tao, L. (2016). Bio-jet fuel conversion technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53*, 801-822. doi:10.1016/j.rser.2015.09.016

Wang, W.-C., Tao, L., Markham, J., Zhang, Y., Tan, e., Batan, L., . . . Biddy, M. (2016). *Review of Biojet Fuel conversion Technologies (Appendix A1)*. Retrieved from Oak Ridge, TN, USA: www.nrel.gov/publications

Withers, M. R., Malina, R., Gilmore, C. K., Gibbs, J. M., Trigg, C., Wolfe, P. J., . . . Barrett, S. R. H. (2014). Economic and environmental assessment of liquefied natural gas as a supplemental aircraft fuel. *Progress in Aerospace Sciences, 66*, 17-36. doi:10.1016/j.paerosci.2013.12.002

Yang, Y., Xin, Z., He, Q. S., Corscadden, K., & Niu, H. (2018). An overview on performance characteristics of biojet fuels. *Fuel, 237 (2019)*, 916-936. doi:https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.10.079

Yim, S. H. L., Lee, G. L., Lee, I. H., Allroggen, F., Ashok, A., Caiazzo, F., . . . Barrett, S. R. H. (2015). Global, regional and local health impacts of civil aviation emissions. *Environmental Research Letters, 10*(3). doi:10.1088/1748-9326/10/3/034001

Zech, K. M., Dietrich, S., Reichmuth, M., Weindorf, W., & Müller-Langer, F. (2018). Techno-economic Assessment of a renewable bio-jet-fuel production using Power-To-Gas. *Applied Energy, 231*, 997-1006. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.169

Zhang, C., Hui, X., Lin, Y., & Sung, C.-J. (2016). Recent development in studies of alternative jet fuel combustion: Progress, challenges, and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54*, 120-138. doi:10.1016/j.rser.2015.09.056

Zhang, Y., Oates, L. G., Serate, J., Xie, D., Pohlman, E., Bukhman, Y. V., . . . Ong, R. G. (2018). Diverse lignocellulosic feedstocks can achieve high field-scale ethanol yields whil providing flexibility for the biorefinery and landscape-level environmental benefits. *Bioenergy, 2018; 10*, 825-840. doi:10.1111/gcbb.12533

Zschocke, A., Scheuermann, S., & Ortner, J. (2012). *High Biofuel Blends in aviation (HBBA)* (ENER/C2/2012/420-1). Retrieved from https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/final_report_for_publication.pdf

# Bijlage A Verzamelstaat met samenvattingen gebruikte literatuur

Zie los elektronisch supplement.

faculteit Management, Science & Technology,
Vakgroep Science
Open Universiteit
Postbus 2960
6401 DL Heerlen, NL
tel. +31 45 576 2877
secretariaat.mst@ou.nl
www.ou.nl/nw
www.Incompany-milieuadvies.nl

Open Universiteit
www.ou.nl