



# Kosten en baten van een SAF- bijmengverplichting op Eindhoven Airport



# Inhoudsopgave

- 1 Managementsamenvatting
- 2 Introductie
- 3 CO<sub>2</sub>-reductiebehoefte middels SAF
- 4 Extra SAF in 2030
- 5 Kosten en baten
- 6 Referenties

## Bijlagen

- A Niet-CO<sub>2</sub>-effecten
- B Overzicht vloot Eindhoven airport 2030

# 1 Managementsamenvatting

Eindhoven Airport heeft heldere doelen geformuleerd voor de reductie van de geluidsbelasting en CO<sub>2</sub>-emissies van het burgervliegverkeer vanaf de luchthaven in 2030. Voor de CO<sub>2</sub>-uitstoot van het vertrekkende vliegverkeer wordt een reductie van 30% ten opzichte van 2019 beoogd. Een belangrijke maatregel om dit doel te bereiken, is het invoeren van een hogere bijmengverplichting voor Sustainable Aviation Fuel (SAF). SAF is een hernieuwbare brandstof die onder andere wordt geproduceerd uit duurzame grondstoffen, zoals plantaardige oliën, afvalvetten of biomassa met als resultaat een lagere CO<sub>2</sub>-uitstoot per liter brandstof. In dit onderzoek zijn de kosten en de maatschappelijke baten van deze bijmengverplichting op Eindhoven Airport in kaart gebracht.

## Behoefde voor CO<sub>2</sub>-reductie middels SAF in 2030

De benodigde hoeveelheid SAF is afhankelijk van de uitstoot in 2030 zonder extra SAF-bijmenging. Daarom is een prognose opgesteld van de verwachte CO<sub>2</sub>-uitstoot van alle vertrekkende vluchten in 2030 op basis van volgende uitgangspunten:

- het netwerk en de vloot voor Eindhoven Airport in 2030 met 40.500 vliegbewegingen volgens het mer-scenario 2b;
- vlootvernieuwing en vlootverzwaring van de volledige vloot;
- vervanging van klein verkeer door groothandelsverkeer;

- ontwikkelingen in het luchtruim zorgen voor een halvering van de omvliegfactor en continuous descent approaches op alle vluchten;
- 6% SAF-bijmenging volgens de ReFuelEU Aviation-bijmengverplichting.

Door deze maatregelen dalen de CO<sub>2</sub>-emissies van de vertrekkende vluchten van Eindhoven Airport in 2030 met 17-18% ten opzichte van 2019. De resterende 12-13% om het doel van -30% te bereiken moeten worden gereduceerd door de aanvullende SAF-bijmengverplichting van Eindhoven Airport.

## Benodigde hoeveelheid SAF

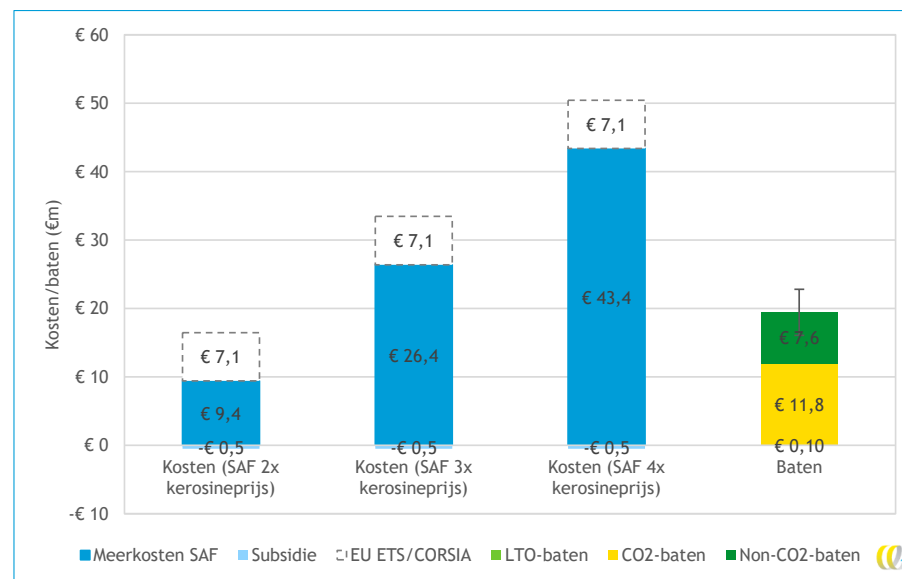
Hoeveel SAF bijgemengd moet worden om deze emissiereductie te realiseren hangt af van de life-cycle-emissiereductiefactor (ERF) van de geleverde SAF ten opzichte van fossiele kerosine. Volgens de Renewable Energy Directive (RED), dient SAF een minimale ERF te hebben van 65%. In deze studie worden de effecten ingeschat voor een lage ERF van 70% en een hoge ERF van 93%. De resulterende SAF-bijmengpercentages stijgen van 6 naar 28% bij de lage ERF en 21% bij de hoge ERF. Bij de hoge ERF SAF is er minder SAF nodig om dezelfde CO<sub>2</sub>-reductie te realiseren, vandaar dat hier het bijmengpercentage lager is. De totale benodigde

hoeveelheid SAF op Eindhoven Airport in 2030 stijgt van 7,3 miljoen liter naar 34 en 25 miljoen liter, afhankelijk van de ERF. De 21-28% bijmenging van SAF, brengt Eindhoven Airport daarmee in 2030 al richting het EU-mandaat voor 2035 tot 2040.

### Kosten en baten van de bijmengverplichting in 2030

De totale maatschappelijke kosten en baten van het extra bijmengen van SAF op Eindhoven Airport zijn weergegeven in Figuur 1. In deze berekening is gerekend met een emissie-reductiefactor voor SAF van 70% ten opzichte van kerosine. Bij een hogere emissiereductiefactor is minder SAF-bijmenging nodig, wat effect heeft op zowel de kosten als de baten (zie Figuur 2).

Figuur 1 - Kosten en baten van het extra SAF bijmengen op Eindhoven Airport in 2030 bij een SAF-emissiereductiefactor van 70%



Door het extra bijmengen van SAF, reduceren de kosten die luchtvaartmaatschappijen moeten betalen voor EU ETS allowances en CORSIA offsets met ongeveer 7 miljoen euro. Omdat het onbekend is wat de prijs van SAF zal zijn in 2030, zijn de kosten voor een SAF-prijs van 2 keer, 3 keer en 4 keer de fossiele kerosineprijs weergegeven. Bovendien heeft Eindhoven Airport aangegeven te overwegen SAF-subsidies van 0,5 miljoen euro per jaar ter beschikking te stellen. Na aftrek van de subsidies en besparingen voor EU ETS en CORSIA ontstaan meerkosten tussen 9,4 en 43,4 miljoen euro. Hier tegenover staan baten van in totaal 19,5 miljoen euro.

Deze worden bijna 100% verklaard door een reductie van de klimaatimpact van de luchtvaart, door een vermindering van de CO<sub>2</sub> en een reductie van de niet-CO<sub>2</sub>-klimaateffecten. De baten als gevolg van een reductie van andere schadelijke stoffen tijdens de Landing-Take-Off (LTO) zijn met 0,1 miljoen euro beperkt.

De baten van het extra SAF bijmengen zijn groter dan de kosten in het geval dat de SAF-prijs twee keer zo hoog is als de fossiele kerosineprijs. Concreet betekent dit dat de bijmengverplichting in termen van maatschappelijke kosten dan 'geld oplevert'. Maar, dit resultaat verandert bij een hogere SAF-prijs. Bij een SAF-prijs van 3 keer en 4 keer de fossiele kerosineprijs zijn de kosten hoger dan de baten. In dit geval zal de bijmengverplichting in termen van maatschappelijke kosten 'geld kosten'. Het break-even-punt zit bij een SAF-prijs van 2,6 keer de fossiele kerosineprijs. Is de SAF duurder dan is de maatregel niet kostenefficiënt, echter zal de maatregel alsnog bijdragen aan het opschalen van de productie en het gebruik van SAF en de klimaatimpact van luchtvaart vanaf Eindhoven Airport reduceren.

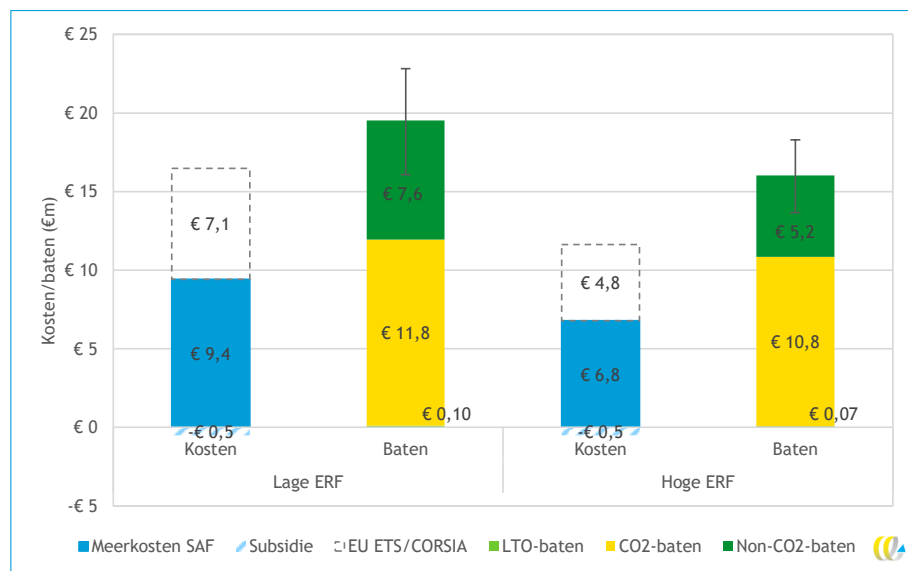
In Figuur 2 worden de kosten en baten vergeleken voor een lage (70%) en hoge (93%) emissiereductiefactor van SAF ten opzichte van kerosine. Bij een hogere ERF moet minder SAF bijgemengd worden waardoor de kosten dalen en ook de niet-CO<sub>2</sub>-klimaateffecten dalen. De reden voor de lagere CO<sub>2</sub>-baten wordt verklaard door het feit dat de reductieopgave bij

een hoge ERF kleiner is. Het is namelijk aangenomen dat de 6% SAF die volgens de ReFuelEU-bijmengverplichting bijgemengd wordt, in deze variant eveneens de hoge ERF heeft.

Door de grote onzekerheden bij de ontwikkeling van de prijzen en emissiereductiefactoren van SAF, kan geen eenduidig antwoord gegeven worden of de kosten-baten-balans van de bijmengverplichting in 2030 positief of negatief uit gaat vallen. Aanvullende belangrijke onzekerheden zijn:

- de kerosineprijs;
- de prijs van emissierechten in het EU ETS;
- milieuprijzen van CO<sub>2</sub>-uitstoot en niet-CO<sub>2</sub>-klimaateffecten.

Figuur 2 - Kosten en baten van het extra SAF bijmengen op Eindhoven Airport in 2030 voor een lage (70%) en hoge (93%) emissiereductiefactor, waarbij SAF twee keer zoveel kost als kerosine



### Effect op ticketprijzen

De effecten van een SAF-bijmengverplichting zullen waarschijnlijk effect hebben op de ticketprijzen voor vluchten vanaf Eindhoven Airport. Hoe dat exact gaat zijn, hangt af van strategische beslissingen van airlines. Om van het effect een indicatie te geven, zijn de effecten van een theoretische evenredige 100%-kostendoorgave op alle passagiers berekend.

De extra kosten voor tickets zijn vooral afhankelijk van de meerprijs van SAF ten opzichte van fossiele kerosine. In dit

voorbeeld is aangenomen dat SAF per kg 1,60 euro duurder is dan fossiele kerosine (3 keer zo duur). Bovendien is met een ERF van 70% gerekend waardoor 22% extra SAF-bijmenging nodig is. Voor de besparing bij EU ETS is met 130 euro per ton CO<sub>2</sub> gerekend en bij CORSIA met 4 euro per ton CO<sub>2</sub>. De uitkomsten zijn weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1 - Meerprijs voor vliegtickets vanaf Eindhoven indien SAF drie keer zo duur is als kerosine bij een ERF van 70%

Bestemming	Meerprijs SAF (€)	Minder kosten EU ETS/CORSIA (€)	Meerprijs ticket (€)
Stansted	3,59	0,92	2,67
Malaga	12,04	3,09	8,95
Alicante	10,21	2,62	7,59
La Palma	20,56	5,28	15,28
Sal (CV)	28,44	0,22	28,22

Voor de meest voorkomende route naar London Stansted stijgen de ticketprijzen met 2,67 euro. Voor andere top 3-bestemmingen, Malaga en Alicante stijgen de ticketprijzen met respectievelijk 8,95 euro en 7,59 euro. Voor de Europese bestemmingen is de grootste stijging 15,28 euro naar La Palma. De grootste toename in ticketprijzen wordt verwacht naar Sal in Kaapverdië met 28,22 euro. Dit komt omdat deze bestemming niet onder het EU ETS valt en voor CO<sub>2</sub>-emissies onder CORSIA ook in 2030 waarschijnlijk nog significant lagere kosten zijn.

Hierdoor wordt een veel kleiner deel van de meerkosten voor SAF gecompenseerd dan bij bestemmingen binnen de EER.

Naarst de puntschatting voor de meerkosten per vliegticket is ook een range van de mogelijke aanvullende kosten berekend. Hierbij zijn de SAF-meerkosten gevarieerd tussen een factor 2 en 4 ten opzichte van kerosine in combinatie met ERF's tussen 70 en 93%. Voor de Europese bestemmingen variëren de meerkosten tussen 0,60 euro en 25,56 euro. Voor Sal kunnen de meerkosten oplopen tot 42,44 euro. De bandbreedtes voor de individuele bestemmingen uit Tabel 1 zijn:

- London Stansted: 0,60 euro tot 4,46 euro extra;
- Malaga: 2,00 euro tot 14,97 euro extra;
- Alicante: 1,69 euro tot 12,69 euro extra;
- La Palma: 3,41 euro tot 25,56 euro extra;
- Sal (CV): 9,54 euro tot 42,44 euro extra.

# 2 Introductie

## 2.1 Verduurzamingsplan Eindhoven Airport

Eindhoven Airport heeft heldere reductiedoelen voor 2030 geformuleerd voor de reductie van de geluidsbelasting en CO<sub>2</sub>-emissies van het burgervliegverkeer vanaf de luchthaven. De belangrijkste doelen zijn:

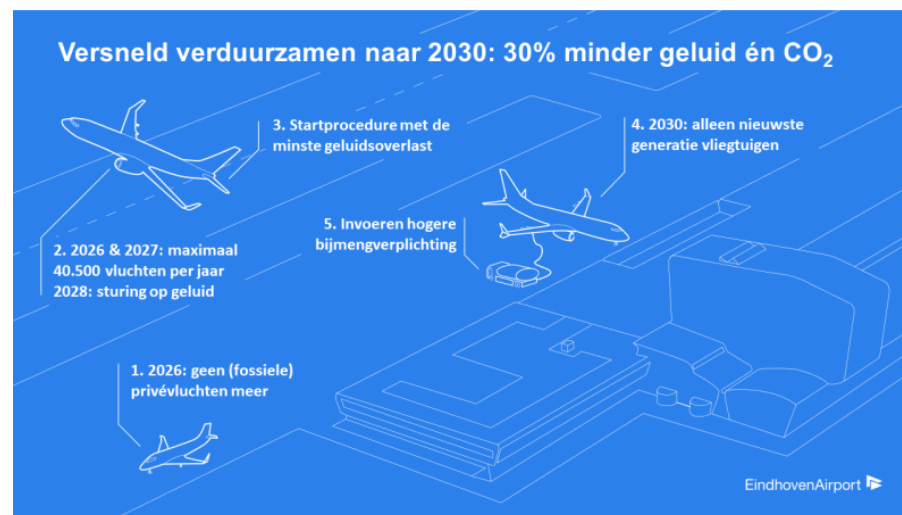
- geluidsbelasting in 2030 met 30% te verminderen ten opzichte van 2019<sup>1</sup>;
- activiteiten op de luchthaven verduurzamen zodat deze in 2030 (net) zero CO<sub>2</sub>e zijn;
- 30% minder CO<sub>2</sub>-uitstoot dan in 2019 voor het vertrekkende vliegverkeer vanaf de luchthaven.

De luchthaven noemt op de eigen website (Eindhoven Airport, 2024): “Dat is niet makkelijk, maar we zijn ervan overtuigd dat het moet én dat het kan.” Het 30%-reductiedoel voor de CO<sub>2</sub>-emissies in 2030 is in lijn met de conclusies van NLR (2024a) en CE Delft (2024) in onderzoeken in opdracht van Schiphol. Beide onderzoeken concluderen dat er in 2030

<sup>1</sup> Het laatste volledige jaar voor de coronapandemie en de hieruit resulterende sterke daling van de mondiale luchtvaart.

minimaal 30 procent CO<sub>2</sub>-reductie nodig is ten opzichte van 2019 om Schiphol en de Europese luchtvaart te ontwikkelen in lijn met Parijs. Dat is meer dan de huidige (nationale) doelstelling van -9 procent.

Figuur 3 - Overzicht van de belangrijkste maatregelen van Eindhoven Airport voor het behalen van de verduurzamingsdoelen in 2030



Figuur 3 geeft een overzicht van de belangrijkste maatregelen die de luchthaven wil nemen om de reductiedoelen voor vertrekkende vluchten voor 2030 te halen. Punt 5 in de lijst is het 'Invoeren hogere bijmengverplichting'. In deze maatregel



wordt de vliegtuigbrandstof kerosine gedeeltelijk vervangen door Sustainable Aviation Fuel (SAF). SAF is een hernieuwbare brandstof die onder andere wordt geproduceerd uit duurzame grondstoffen, zoals plantaardige oliën, afvalvetten of biomassa met als resultaat een lagere CO<sub>2</sub>-uitstoot per liter brandstof.

## 2.2 Onderzoeksvragen en scope van deze studie

In het kader van het invoeren van de beoogde bijmengverplichting heeft Eindhoven Airport de volgende onderzoeksvragen aan CE Delft en NLR gesteld:

- Hoeveel SAF moet in 2030 bijgemengd worden om het CO<sub>2</sub>-reductiedoel van 30% in 2030 ten opzichte van 2019 te bereiken?
- Op welke manier kan het extra bijmengen van SAF op Eindhoven Airport ingevuld worden?
- Wat zijn de kosten en baten voor extra SAF bijmengen om het 30%-CO<sub>2</sub>-reductiedoel te bereiken?

De ReFuelEU Aviation Directive van de Europese Commissie is een Europese bijmengverplichting voor Sustainable Aviation Fuels (SAF). Deze schrijft voor dat alle vertrekkende vluchten

van luchthavens in de Europese Economische Ruimte (EER)<sup>2</sup> in 2030 gemiddeld 6% SAF bijmengen. De beoogde bijmengverplichting van Eindhoven Airport wordt in deze studie als volledig aanvullend beschouwd op ReFuelEU Aviation. Dat houdt in dat een hogere SAF-bijmenging voor vluchten vanaf Eindhoven Airport niet gecompenseerd kan worden door een lagere bijmenging voor andere vluchten die ook onder de ReFuelEU-bijmengverplichting vallen. In de analyse is hiermee rekening gehouden door de volledige meerkosten en alle klimaatbaten van de extra SAF mee te nemen in de kosten-batenanalyse.

Artikel 1 van de RefuelEU Aviation Directive luidt “Deze verordening voorziet in geharmoniseerde regels voor het gebruik en de levering van duurzame luchtvaart brandstoffen”. Dat betekent, zoals bevestigd aan de Tweede en Eerste Kamer (Ministerie van I&W, 2022), dat het niet toegestaan is voor lidstaten om nationaal een hogere bijmengverplichting in te voeren. Hierdoor is het niet duidelijk hoe de Europese Commissie zal reageren op het voorstel voor een hogere bijmengverplichting op Eindhoven Airport. Enkele andere EER-lidstaten (Noorwegen, Zweden, Frankrijk en Duitsland) hebben echter wel een nationale bijmengverplichting of hebben deze aangekondigd (EASA, 2024). Hoe zich dit precies verhoudt met de eerder genoemde interpretatie van RefuelEU Aviation is hier niet in detail

<sup>2</sup> Dat zijn de landen van de Europese Unie, IJsland, Noorwegen en Zwitserland.

onderzocht. Ook het analyseren van juridische uitdagingen en andere mogelijke weerstand tegen de bijmengverplichting van Eindhoven Airport, is geen onderdeel van deze studie. Deze studie mag veel meer worden gezien als input voor de discussie rond de implementatie van de maatregel, waarin de kosten en baten zijn geanalyseerd.

Een groot deel van de CO<sub>2</sub>-emissies van vluchten vanaf Eindhoven Airport zijn onderdeel van het EU ETS, namelijk alle vluchten met een bestemming in de EER (de huidige scope van het EU ETS). Omdat de maximale hoeveelheid EU ETS-emissierechten vaststaat, kan het idee ontstaan dat de inspanningen in Eindhoven teniet worden gedaan door extra emissies in andere EU ETS-sectoren, doordat de emissierechten die niet langer door vluchten vanaf Eindhoven gebruikt worden, nu gebruikt kunnen worden door andere EU ETS-partijen. Dit mechanisme heet het EU ETS waterbed effect. Echter, door het bestaan van de Market Stability Reserve (MSR) is het mogelijk dat een groot deel van de emissiereductie alsnog daadwerkelijk plaatsvindt. Door de onzekerheid van dit effect worden wisselwerkingen met het EU ETS in deze studie buiten beschouwing gehouden (zie ook Tekstkader 1).

#### Tekstkader 1 - Achtergrondinformatie EU ETS

Het Europese systeem voor emissiehandel EU ETS is een cap-and-trade-systeem. Het omvat sectoren zoals de energieopwekking, zware industrie en commerciële luchtvaart binnen de Europese Economische Ruimte (EER). Bedrijven die onder het EU ETS vallen dienen één recht per ton CO<sub>2</sub>-equivalenten in te dienen. Het aantal rechten dat per jaar beschikbaar is, heeft een bovengrens (cap). Omdat de cap per jaar afneemt en rond 2040 nul bereikt, neemt ook de totale hoeveelheid emissies af, die door bedrijven in het systeem mogen worden uitgestoten. Bedrijven ontvangen of kopen emissierechten en kunnen ermee handelen (trade). Als bedrijven minder uitstoten, kunnen ze ongebruikte rechten verkopen, wat financiële prikkels creëert om emissies te verlagen.

Omdat de totale hoeveelheid emissies (cap) vaststaat, zorgt extra emissiereductie binnen één individueel bedrijf in het algemeen niet voor een bruto-emissiereductie in het EU ETS-systeem. Echter, door het bestaan van de Market Stability Reserve (MSR) wordt dit verhaal ingewikkelder. Als er meer rechten op de markt worden aangeboden dan een bepaalde limiet, komen deze in een speciale reserve. Als er weer teveel rechten in deze reserve zitten, wordt het overschot vernietigd. Hierdoor kan het MSR ervoor zorgen dat er wel daadwerkelijk netto-emissiereductie plaatsvindt binnen het EU ETS. Uit analyse in eerder onderzoek blijkt dat een meerderheid van de emissiereductie in 2030 door dit effect daadwerkelijk zal plaatsvinden (CE Delft, 2022). Daarnaast is de vermindering van de emissies juist nodig door de beperking en afname van de totale hoeveelheid emissierechten. Als bedrijven te weinig doen ontstaat er schaarste, wat zorgt voor stijgende prijzen van de EU ETS-rechten.

In de afgelopen jaren is het aandeel rechten dat door de luchtvaart wordt ingediend toegenomen binnen het EU ETS. Dat betekent dat andere sectoren sneller hun emissies gereduceerd hebben, waardoor zij rechten konden verkopen aan bedrijven in de luchtvaart. Hierdoor financiert de luchtvaartsector gedeeltelijk de verduurzaming van andere sectoren. Omdat verwacht wordt dat de EU ETS-prijzen in de komende jaren verder gaan toenemen en de mogelijkheden om luchtvaart te verduurzamen lastig en/of duur zijn (hard-to-abate) zullen de EU ETS-kosten voor de luchtvaart in de komende jaren naar verwachting (sterk) oplopen.

## 2.3 Aanpak in een notendop

De aanpak van deze studie bestaat uit de volgende elementen:

- Opstellen van een toekomstprognose voor 2030 zonder extra SAF-bijmenging, waarbij rekening is gehouden met de andere maatregelen van Eindhoven Airport (zie Figuur 3) en de Fit for 55-maatregelen van de Europese Commissie om de luchtvaart te verduurzamen.
  - Op basis van deze toekomstprognose voor 2030 wordt de resterende reductieopgave in Mton CO<sub>2</sub> voor SAF bepaald, die nodig is om de 30%-CO<sub>2</sub>-reductie ten opzichte van 2019 te realiseren.
  - In kaart brengen van de mogelijkheden om (aanvullend) SAF naar Eindhoven Airport te leveren en inventariseren van de verwachte meerkosten en emissiereductie per liter SAF ten opzichte van kerosine.
  - Bepalen van de benodigde totale hoeveelheid SAF en de meerkosten.
  - Identificeren van maatschappelijke baten en monetariseren. Meegenomen zijn de effecten van een reductie van de CO<sub>2</sub>-emissies en van de niet-CO<sub>2</sub>-klimaateffecten op de hele route van in Eindhoven vertrekkende vluchten en het lokale effect op luchtverontreinigende stoffen die uitgestoten worden tijdens de Landing-Take-Off (LTO) cyclus.
- Vergelijken van kosten en baten en verkennen van onzekerheden.
  - Verkenning van het effect op de ticketprijzen vanaf Eindhoven Airport als airlines de extra kosten volledig doorberekenen aan passagiers.

### 3 CO<sub>2</sub>-reductiebehoefte middels SAF

Om in 2030 aan de doelstelling te voldoen 30% minder CO<sub>2</sub> uit te stoten dan in 2019, is additioneel aan de vanuit ReFuelEU Aviation gemandateerde Sustainable Aviation Fuel (SAF) extra SAF-opname nodig. In totaal is afhankelijk van de lifecycle-emissiereductie die uit SAF behaald kan worden (70-93%) 21 tot 28% SAF-bijmenging nodig in plaats van de gemandateerde 6% SAF om het doel te bereiken, zoals samengevat in Tabel 2.

Tabel 2 - Verwachte reductie in CO<sub>2</sub>-emissies in 2030 t.o.v. 2019 op basis van huidig beleid en de benodigde bijmenging voor het 30% reductiedoel

	Huidig beleid, 6% SAF		Doel 30% reductie in 2030	
Lifecycle-emissiereductie van SAF	70%	93%	70%	93%
Behaalde CO <sub>2</sub> -reductie t.o.v. 2019 incl. SAF en vlootvernieuwing	17%	18%	30%	30%
Benodigde SAF-bijmenging	6%	6%	28%	21%

De SAF-behoefte voor Eindhoven Airport is berekend door eerst het netwerk en de vloot voor 2030 in kaart te brengen en daar vervolgens de brandstofbehoefte voor te berekenen middels het NLR Beyond CO<sub>2</sub>-model, gekalibreerd met historisch brandstofverbruik op Eindhoven Airport. Deze brandstofbehoefte wordt vervolgens vergeleken met het gerealiseerde brandstofverbruik van 2019. Het brandstof-

verbruik in 2019 was circa 140 miljoen liter, terwijl de verwachting is dat voor 2030 122 miljoen liter nodig is. Uit vlootvernieuwing en verbeteringen in het luchtruim wordt al zo'n 13% reductie in de brandstofbehoefte en daarmee CO<sub>2</sub>-uitstoot verwacht vergeleken met de brandstofbehoefte in 2019. De resterende reductieopgave zal middels SAF bewerkstelligd moeten worden.

In de berekening voor de brandstofbehoefte in 2030 wordt op basis van het mer-scenario 2b (NLR, 2024b) rekening gehouden met het aantal vliegbewegingen (40.500), echter aangepast met volledige vlootvernieuwing en vlootverzwaring. Een overzicht van de vloot is beschikbaar in Bijlage B.

Daarnaast wordt aangenomen:

- dat vliegbewegingen met klein verkeer worden vervangen door groothandelsverkeer;
- dat ontwikkelingen in het luchtruim tot halvering van de omvliegfactor zullen leiden en;
- dat continuous descent approaches op alle vluchten worden toegepast.

Een deel van de in 2030 resterende CO<sub>2</sub>-uitstoot wordt daarnaast middels het ReFuelEU Aviation-mandaat<sup>3</sup> voor SAF gemitigeerd (6% in 2030, zoals geschetst in Tabel 3), zodat een reductie van 17-18%, zoals in Tabel 2, kan worden bereikt met de huidige plannen.

Tabel 3 - Per ReFuelEU Aviation gemandateerde brandstofmix

Brandstofmix	2025	2030	2035	2040	2045	2050
SAF (minimaal aandeel)	2,0%	6,0%	20,0%	34,0%	42,0%	70,0%
Synthetische brandstoffen (minimaal aandeel)	0,0%	1,2%	5,0%	10,0%	15,0%	35,0%
Bio-SAF (resterend aandeel)	2,0%	4,8%	15,0%	24,0%	27,0%	35,0%
Fossiele kerosine	98,0%	94,0%	80,0%	66,0%	58,0%	30,0%
<b>Totaal</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

De totale benodigde hoeveelheid brandstof in 2030 wordt geschat op 122 miljoen liter. Om het 30%-CO<sub>2</sub>-reductiedoel te bereiken, is naast vlootvernieuwing en de gemandateerde SAF daarmee nog behoefte aan CO<sub>2</sub>-reductie middels additionele SAF. De totale behoefte aan SAF komt in geval van additionele bijmenging uit op 25-34 miljoen liter in plaats van 7,3 miljoen liter, afhankelijk van de reductie die uit SAF behaald kan worden. De 21-28% bijmenging van SAF brengt Eindhoven Airport daarmee in 2030 al richting het EU-mandaat voor 2035 tot 2040.

<sup>3</sup> [www.eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/2405/oj](http://www.eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/2405/oj)

# 4 Extra SAF in 2030

Van groot belang voor de kosten-batenanalyse zijn de emissiereductiefactor (ERF) en de meerkosten van SAF ten opzichte van fossiele kerosine. Om inzicht te krijgen in de kenmerken van de geleverde SAF naar Eindhoven Airport is een literatuuranalyse uitgevoerd en hebben we interviews met de twee brandstofleveranciers van Eindhoven Airport afgenomen. Dit zijn Shell en TotalEnergies.

## 4.1 Emissiereductiefactor

De emissiereductiefactor (ERF) van SAF bepaalt de procentuele afname van de CO<sub>2</sub>-emissies ten opzichte van fossiele kerosine (gemiddeld 3,16 kg CO<sub>2</sub> per kg brandstof tank-to-wing). De ERF houdt rekening met emissies tijdens de gehele levensduur van de brandstof. Van grondstofwinning, verwerking en transport naar het verbranden van de brandstof tijdens het vliegen. Dit wordt ook wel een levenscyclusanalyse (LCA) genoemd. Een hogere ERF zorgt voor een grotere afname in CO<sub>2</sub>-emissies en dus meer baten in de vorm van CO<sub>2</sub>-reductie per liter brandstof.

De ERF kan verschillen tussen verschillende SAF-productieroutes en hangt af van diverse factoren, waaronder de gebruikte hernieuwbare grondstof, het productieproces en het transport van grondstoffen en SAF. De ERF van SAF zal toenemen als het transport, de grondstof en de energiemix benodigd voor de productie van de brandstof schoner worden.

De Renewable Energy Directive (RED) III<sup>4</sup>, belangrijk Europees beleid ter stimulering van hernieuwbare energie, schrijft voor dat de minimale emissiereductiefactor van SAF ten opzichte van fossiele kerosine 65% moet zijn voor SAF van biologische origine en 70% voor synthetische SAF (e-fuels). Alleen als SAF aan deze en andere criteria uit de REDIII voldoet, kan deze ingezet worden onder de ReFuelEU Aviation-bijmengverplichting en mag onder het EU ETS gerekend worden met een nulmissiefactor, waardoor geen EU ETS-rechten nodig zijn bij gebruik. Voor een overzicht van de ERF van verschillende SAF-productieroutes en grondstoffen verwijzen we naar Destination 2050 (NLR & SEO, 2021).

In de interviews gaven de brandstofleveranciers aan dat de exacte ERF in 2030 nog onzeker is en hun inschattingen varieerden sterk van elkaar. Voor de robuustheid van deze studie is er daarom voor gekozen om zowel met een lage gemiddelde ERF van 70% en een hoge gemiddelde ERF van 93% te rekenen.

<sup>4</sup> De REDIII is formeel gezien een heruitgave van de REDII.

Een relevante eigenschap van de ReFuelEU Aviation-bijmengverplichting is dat dit volume gebaseerd is op de minimale ERF vanuit de RED. Doordat het beleid is gebaseerd op SAF-volumes, is er geen drijfveer voor brandstofproducten om SAF te produceren en naar EU-landen te leveren met een hogere ERF. De voorgestelde extra SAF-bijmengverplichting op Eindhoven Airport komt voort uit het doel 30% CO<sub>2</sub>-reductie te behalen, waardoor er in tegenstelling tot het ReFuelEU-mandaat wel een drijfveer bestaat om brandstof met een hogere ERF te leveren aan Eindhoven Airport. Een hogere ERF betekent immers meer CO<sub>2</sub>-reductie en zorgt er dus voor dat de benodigde hoeveelheid SAF minder wordt. Het is daarom denkbaar dat SAF met een hogere ERF naar Eindhoven geleverd gaat worden, indien er de juiste (financiële) prikkel gezet wordt. Levering van SAF met een hogere ERF zou namelijk een hogere waarde hebben omdat het 30%-CO<sub>2</sub>-reductiedoel dan sneller bereikt wordt, terwijl op andere luchthavens deze waarde er niet is en alleen moet worden voldaan aan de ReFuelEU Aviation-bijmengverplichting. Dit zou ervoor zorgen dat dezelfde emissiereductie gerealiseerd kan worden met minder benodigde brandstof, wat potentieel leidt tot lagere kosten voor luchtvaartmaatschappijen.

## 4.2 Meerkosten van SAF

De extra SAF die Eindhoven Airport in 2030 nodig heeft om het CO<sub>2</sub>-emissiereductiedoel te bereiken, zal naar verwachting geproduceerd worden via Hydrotreated Esters and Fatty Acids (HEFA). HEFA-SAF wordt onder andere gemaakt van gebruikt frituurvet en oliën. Op dit moment is HEFA-SAF de best ontwikkelde, goedkoopste en de enige op grotere schaal beschikbare SAF-productieroute. De verwachting is dat er in 2030 nog voldoende grondstoffen beschikbaar zijn voor het produceren van HEFA-SAF om aan de wereldwijde vraag te voldoen.

De geïnterviewde brandstofleveranciers verwachten daarnaast dat andere bio-SAF-productieroutes als Alcohol-to-Jet (AtJ) en Fischer-Trops (FT) pas in 2035 (commercieel) een realistische optie worden en op grotere schaal beschikbaar zullen zijn. Het ReFuelEU Aviation-mandaat heeft voor 2030 een subtarget voor synthetische brandstof (e-fuels). Doordat synthetische brandstof naar verwachting ook in 2030 nog veel duurder zal zijn om te produceren dan SAF van biologische oorsprong, is het logisch om aan te nemen dat deze niet gebruikt zal worden om te voldoen aan de extra bijmengverplichting van Eindhoven Airport.

De meerprijs van SAF ten opzichte van fossiele kerosine heeft een grote invloed op de kosten/baten van de extra SAF-bijmengverplichting. Een hogere meerprijs zorgt ervoor dat de kosten stijgen en de kosten-batenverhouding lager wordt. De prijs van fossiele kerosine is sterk gecorreleerd aan de olieprijs. Voor SAF wordt een groot deel van de kosten bepaald door het oogsten van de grondstof, het produceren en het blenden van SAF met fossiele kerosine.

De prijs van fossiele kerosine varieert de afgelopen jaren sterk, onder andere door stijgende olieprijsen. Tabel 4 laat de gemiddelde brandstofprijzen van de afgelopen jaren zien. De tabel laat zien dat SAF ongeveer 2 tot 4 keer zo duur is als kerosine. De European Union Aviation Safety Agency (EASA) stelt dat op dit moment de prijs van SAF tussen de 1,5 en 6 hoger ligt dan de fossiele kerosineprijs (EASA, 2022). Redenen voor deze grote range in meerkosten zijn onder andere de grote onzekerheid over de productiekosten van SAF en de rijpheid van de technologie en industriële opschaling.

Tabel 4 - Gemiddelde brandstofprijzen

Brandstofprijs (€/kg)	2020	2021	2022
Kerosine (jet fuel)	0,32	0,52	1,04
SAF	1,24	1,81	2,31
Meerprijs	3,9x	3,5x	2,2x

Bron: (IATA, 2023)

De ReFuelEU Aviation Impact Assessment (IA) stelt dat de huidige fossiele kerosineprijs circa 0,59 €/kg is en dat HEFA-SAF op dit moment tussen de 1,4 en 1,9 keer zo duur is als fossiele kerosine. Uit hetzelfde onderzoek komt naar voren dat de verwachting is dat de prijs van HEFA ongeveer op het niveau van de prijs van fossiele kerosine ligt in 2030, rond de 1 euro per kg (EC, 2021). Dit wordt echter niet veroorzaakt door een verwachte daling van de HEFA-SAF-prijs, maar door een verwachte stijging van de fossiele kerosineprijs. De verwachting is dat de HEFA-SAF-prijs vrijwel constant blijft of licht stijgt. IATA bevestigt deze verwachting in hun onderzoek naar de Minimum Selling Price (MSP) van verschillende SAF-routes, die licht toeneemt in de toekomst (IATA, 2024). Er is echter een grote onzekerheid over de te verwachte kerosine- en SAF-prijs in 2030, onder andere door de onzekerheid in olieprijs en opschaling en productiekosten van SAF. De twee geïnterviewde brandstofleveranciers verwachten in tegenstelling tot de ReFuelEU IA dat de meerprijs van HEFA-SAF ten opzichte van kerosine in 2030 tussen de 2 en 4 ligt. Daarnaast werd aangegeven dat de meerprijs van SAF toe kan nemen door de ReFuelEU-bijmengverplichting.

Doordat brandstofleveranciers, luchtvaartmaatschappijen en autoriteiten in 2030 al rapportageverplichtingen hebben voor ReFuelEU nemen we aan dat er geen administratieve meerkosten zullen zijn.



## 4.3 SAF-levering naar Eindhoven

Op dit moment wordt nog geen SAF naar Eindhoven Airport geleverd, doordat er geen vraag is van de actieve luchtvaartmaatschappijen.

De militaire luchthaven Eindhoven is aangesloten op de Defensie Pijpleiding Organisatie (DPO), dit is het Nederlandse deel van de *Central European Pipeline System* (CEPS). Het civiele deel van de luchthaven, Eindhoven Airport, is daarentegen niet aangesloten op het pijpleidingnetwerk. Brandstof wordt hierdoor met tankwagens voor burgerluchtvaart aan de luchthaven geleverd. Doordat Eindhoven Airport niet over een eigen brandstofdepot beschikt, rijden tankwagens dagelijks met fossiele kerosine op en neer tussen Eindhoven Airport en Rotterdam, waar de brandstof wordt geproduceerd.

Fysieke levering van SAF aan Eindhoven Airport brengt operationele uitdagingen met zich mee die kunnen leiden tot extra kosten. Er zullen aparte tankwagens met SAF naar de luchthaven moeten rijden vanaf de locatie waar SAF wordt geproduceerd (en gemengd met fossiele kerosine). Het aanbieden van verschillende blends SAF op EIN zou het nog duurder maken (hoewel airlines dit mogelijk interessant

vinden door verschil in kosten voor EU ETS-rechten en CORSIA offsets), mede door de afwezigheid van een brandstofdepot. Deze meerkosten zijn niet meegenomen in deze analyse omdat niet duidelijk is of de extra SAF fysiek naar Eindhoven Airport geleverd zal/kan worden. Hier staat tegenover, dat bij de berekening van de baten wordt uitgegaan van het netwerk van Eindhoven Airport wat zorgt voor een conservatieve inschatting van baten, met name bij de niet-CO<sub>2</sub>-effecten. Indien de extra SAF niet fysiek naar Eindhoven Airport geleverd zou kunnen worden, maar in plaats daarvan getankt wordt op Schiphol, zou deze op gemiddeld langere vluchten worden ingezet, omdat het netwerk van Eindhoven Airport geen intercontinentale verbindingen heeft. Omdat de niet-CO<sub>2</sub>-klimaat effecten op lange vluchten absoluut en relatief groter zijn op lange vluchten dan op kortere vluchten, en SAF-bijmengen de effecten reduceert, levert de inzet van een liter SAF op lange vluchten meer winst op voor het klimaat dan op een korte vlucht.

Op dit moment wordt voor het voldoen aan verplichtingen en vrijwillig bijmengen van SAF veel gebruik gemaakt van een book-and-claim-systeem of mass-balancing. Dat wil zeggen dat luchtvaartmaatschappijen de SAF kopen en de emissie-reductie claimen, maar zij niet degene zijn die per definitie de brandstof fysiek geleverd krijgen. Fysieke levering kan, in tegenstelling tot een book-and-claim-systeem, leiden tot extra emissies en kosten van het transport van de SAF naar Eindhoven Airport.

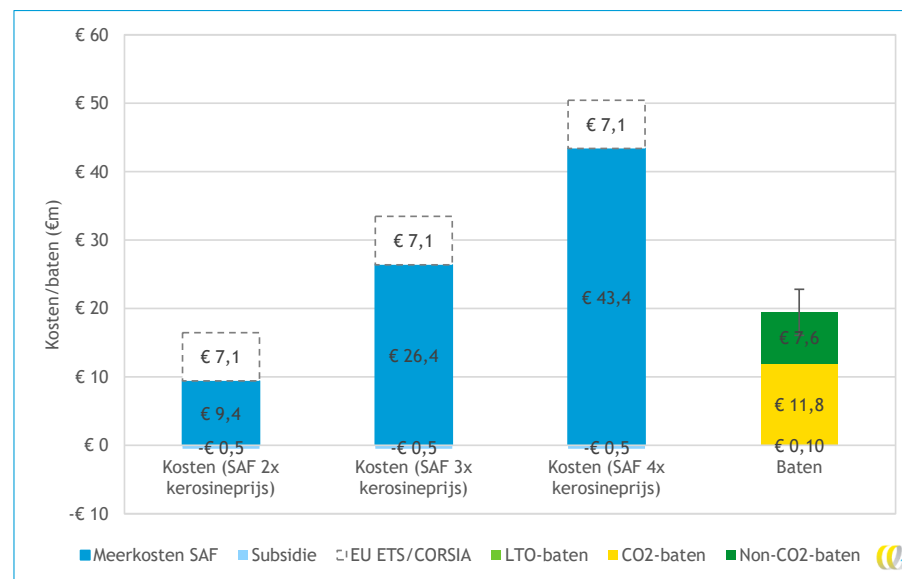
# 5 Kosten en baten

## 5.1 Totale kosten en baten

In dit hoofdstuk worden de kosten en baten voor een aanvullende bijmengverplichting voor SAF op Eindhoven Airport voor het jaar 2030 berekend. Afhankelijk van de emissiereductiefactor van de geleverde SAF ten opzichte van kerosine, moet er in 2030 15-22% SAF bijgemengd worden op Eindhoven Airport, aanvullend op de 6% van de ReFuelEU Aviation-bijmengverplichting. Samen met de andere verduurzamingsmaatregelen van de luchthaven, zorgt dit voor een emissiereductie van 30% ten opzichte van 2019.

De totale maatschappelijke kosten en baten van het extra bijmengen van SAF op Eindhoven Airport zijn weergegeven in Figuur 4. In deze berekening is gerekend met een emissiereductiefactor voor SAF van 70% ten opzichte van kerosine. Bij een hogere emissiereductiefactor is minder SAF-bijmenging nodig, wat effect heeft op zowel de kosten als de baten (zie Paragraaf 0).

Figuur 4 - Kosten en baten van het extra SAF bijmengen op Eindhoven Airport in 2030 bij een SAF emissiereductiefactor van 70%



Door het extra bijmengen van SAF, reduceren de kosten die luchtvaartmaatschappijen moeten betalen voor EU ETS allowances en CORSIA offsets met ongeveer 7 miljoen euro. Omdat het onbekend is wat de prijs van SAF zal zijn in 2030, zijn de kosten voor een SAF-prijs van 2 keer, 3 keer en 4 keer de fossiele kerosineprijs weergegeven. Bovendien heeft Eindhoven Airport aangegeven te overwegen SAF-subsidies van 0,5 miljoen euro per jaar ter beschikking te stellen. Na aftrek van de subsidies en besparingen voor EU ETS en CORSIA ontstaan meerkosten tussen 9,4 en 43,4 miljoen euro. Hier tegenover staan baten van in totaal 19,5 miljoen euro.

Deze worden bijna 100% verklaard door een reductie van de klimaatimpact van de luchtvaart, door een vermindering van de CO<sub>2</sub> en een reductie van de niet-CO<sub>2</sub>-klimaateffecten. De baten als gevolg van een reductie van andere schadelijke stoffen tijdens de Landing-Take-Off (LTO) zijn met 0,1 miljoen euro beperkt.

De baten van het extra SAF bijmengen zijn groter dan de kosten in het geval dat de SAF-prijs twee keer zo hoog is als de fossiele kerosineprijs. Concreet betekent dit dat de bijmengverplichting in termen van maatschappelijke kosten dan 'geld oplevert'. Maar, dit resultaat verandert bij een hogere SAF-prijs. Bij een SAF-prijs van 3 keer en 4 keer de fossiele kerosineprijs zijn de kosten hoger dan de baten. In dit geval zal de bijmengverplichting in termen van maatschappelijke kosten 'geld kosten'. Uit een verdere onzekerheidsanalyse blijkt dat het break-even-punt zit bij een SAF prijs van 2,6 keer de fossiele kerosineprijs. Is de SAF duurder, dan is de maatregel niet kostenefficiënt, echter zal de maatregel alsnog bijdragen aan het opschalen van de productie en het gebruik van SAF en de klimaatimpact van luchtvaart vanaf Eindhoven Airport reduceren.

In het vervolg van dit hoofdstuk wordt de berekening van de kosten en baten in detail toegelicht, worden in Paragraaf 0 onzekerheidsanalyses beschreven en in Paragraaf 5.6 de effecten van de bijmengverplichting op de ticketprijzen vanaf Eindhoven Airport ingeschat.

## 5.2 Kosten

Zoals hiervoor benoemd, zijn voor de opbouw van de kosten drie componenten relevant:

- **meerprijs SAF** (ten opzichte van fossiele kerosine);
- **daling EU ETS en CORSIA-kosten** (voor SAF dat aan de eisen van de Renewable Energy Directive (RED III) of respectievelijk CORSIA voldoet, dienen geen EU ETS-rechten ingeleverd te worden of zijn minder CORSIA offsets nodig);
- **subsidie Eindhoven Airport** (een deel van het kostenverschil tussen SAF en fossiele kerosine wordt gedekt door subsidies van de luchthaven).

De belangrijkste kostencomponent is de meerprijs die voor SAF betaald moet worden ten opzichte van fossiele kerosine. De prognoses voor 2030 hiervoor, lopen sterk uiteen van een gelijke prijs voor HEFA-SAF als fossiele kerosine (EC, 2021) tot een prijs die bijna 4 keer zo hoog is (SEO & NLR, not published yet). De brandstofleveranciers gaven in de interviews aan dat in 2030 alleen met HEFA-SAF bijgemengd zal worden en dat naar hun verwachting de prijs 2 tot 4 keer zo hoog zal zijn als van fossiele kerosine. Met SAF dat wordt geproduceerd via andere productieroutes wordt in significante hoeveelheden

pas vanaf 2035 gerekend<sup>5</sup>. Voor het kostenplaatje in Figuur 4 is daarom gekozen om de maatschappelijke kosten te laten zien voor een variatie van de SAF-kosten ten opzichte van fossiele kerosine tussen een factor 2 en 4. Aanvullende transportkosten en administratieve kosten zullen verwaarloosbaar klein zijn, omdat met ReFuelEU Aviation toch al een bijmengverplichting bestaat en het hier alleen om een ophoging van het percentage gaat.

Een andere belangrijke kostencomponent zijn de EU ETS allowance en CORSIA-offset-prijzen die moeten worden betaald voor de CO<sub>2</sub>-uitstoot van fossiele kerosine. Doordat deze allowances of offsets niet of minder hoeven te worden gebruikt bij SAF, geeft dit een kostenbesparing. Dit zorgt ervoor dat het prijsverschil tussen kerosine en SAF kleiner wordt, indien de geleverde SAF voldoet aan de criteria uit de RED III en CORSIA, waarvan in deze studie wordt uitgegaan. EU ETS-rechten zijn aanzienlijk duurder dan CORSIA offsets vanwege fundamentele verschillen in de structuur, ambitie, en marktwerking van beide systemen. Voor de prijzen in 2030 is aangesloten bij ander recent onderzoek (SEO et al., 2023), waarin voor het EU ETS €130/ton en voor CORSIA €4/ton genoemd worden. We gaan er verder van uit dat de Revision

<sup>5</sup> In RefuelEU Aviation heeft in 2030 een subtarget voor synthetische brandstoffen van 1,2%. Deze kunnen zeer hoge emissiereductiefactoren hebben. Echter, zullen deze veel duurder zijn dan bio-SAF en is het niet voor de hand liggend dat deze ingezet zullen worden voor de aanvullende bijmengverplichting van Eindhoven Airport.

of the Energy Taxation Directive (ETD) in 2030 niet van toepassing zal zijn<sup>6</sup>. Ook is in deze studie geen rekening gehouden met Europese SAF allowances (zie Tekstkader 2). Met deze maatregel wil de Europese Commissie een (groot) deel van de meerkosten van SAF volgens een first-come first-serve principe vergoeden. Indien airlines hier gebruik van kunnen maken zal dit een grote invloed kunnen hebben op de kosten-batenanalyse omdat de meerkosten significant dalen.

#### Tekstkader 2 - De impact van free SAF allowances op de SAF-kosten

De Europese Commissie is van plan om 20 miljoen SAF allowances beschikbaar te stellen voor de periode 2024-2030 om het verschil in kosten tussen SAF en kerosine deels te vergoeden, op basis van een first-come first-serve principe. Deze SAF allowances zouden voor het bijmengen met HEFA op basis van used cooking oil (UCO) de meerkosten met 50% kunnen verlagen, bij advanced biofuels met 75% en met 95% bij e-fuels. Momenteel is niet duidelijk of in 2030 nog allowances beschikbaar zullen zijn of dat ze in de tussentijd al allemaal gebruikt zijn. Daarom is er in deze studie geen rekening gehouden met deze SAF allowances.

Eindhoven Airport geeft aan te overwegen een SAF-subsidie te willen instellen van € 500.000 per jaar<sup>7</sup>. Hierdoor wordt het kostenverschil van SAF en kerosine verkleind en nemen de kosten voor airlines af.

<sup>6</sup> De Revision of the Energy Taxation Directive is een van de weinige onderdelen van het Fit for 55-pakket dat nog steeds in onderhandeling is doordat een wijziging van belastingen een unanimitieit van lidstaten vraagt. De vraag is of deze Revision er nog komt en of de tarieven voor luchtvaart dan daarin blijven staan of wegvallen in de onderhandelingen.

<sup>7</sup> Het idee is dat deze subsidie komt uit de non-aviation-inkomsten.

## 5.3 Baten

De baten van het extra SAF bijmengen zijn voornamelijk maatschappelijke effecten. De volgende effecten zijn in kaart gebracht:

- CO<sub>2</sub>-klimaateffect;
- niet-CO<sub>2</sub>-klimaateffecten;
- emissies van schadelijke stoffen tijdens de LTO-cyclus.

De grootste baten komen van de reductie aan CO<sub>2</sub>-emissies door het bijmengen van de extra SAF. Deze zijn berekend over de volledige vlucht van Eindhoven Airport tot de eindbestemming. Afhankelijk van de kwaliteit van de SAF met een lage of hoge CO<sub>2</sub>-emissiereductiefactor (ERF) van 70 of 93% wordt er respectievelijk 47 of 43 kton aan extra CO<sub>2</sub> gereduceerd. Opvallend is dat de CO<sub>2</sub>-effecten groter zijn in de lage ERF-variant dan in de hoge ERF-variant, dit wordt verder toegelicht in Tekstkader 3.

### Tekstkader 3 - Grotere effecten bij een lagere CO<sub>2</sub>-emissiereductiefactor

Zowel voor de CO<sub>2</sub>, niet-CO<sub>2</sub>, als gezondheidseffecten, zijn de effecten groter bij de lage (70%) ERF-variant dan de hoge (93%) ERF-variant. Dit lijkt misschien tegenstrijdig, maar is te verklaren.

Voor CO<sub>2</sub> zit de crux in het feit dat er in het basisscenario al bijmenging plaatsvindt, namelijk 6% volgens de RefuelEU Aviation-bijmengverplichting. Voor de berekening is aangenomen dat deze 6% SAF in het basisscenario van dezelfde kwaliteit is als de extra bijgemengde SAF in de lage en hoge ERF-varianten. Hierdoor zal bij de hoge ERF-variant al meer CO<sub>2</sub> gereduceerd zijn door de 6% SAF-bijmenging en dient er minder SAF aanvullend bijgemengd te worden voor het CO<sub>2</sub>-reductiedoel van -30%. Deze lagere extra hoeveelheid benodigde SAF zorgt vervolgens voor kleinere effecten in CO<sub>2</sub>.

Voor de niet-CO<sub>2</sub>-klimaateffecten en gezondheidseffecten dalen de baten bij een hoge ERF omdat minder liters SAF worden bijgemengd. In de berekeningen is aangenomen dat deze effecten schalen met de hoeveelheid SAF en dat er geen relatie bestaat tussen het effect van SAF op contrails en de ERF.

Naast CO<sub>2</sub>-emissies zorgt luchtvaart ook voor opwarmende effecten die niet met CO<sub>2</sub> te maken hebben. Deze niet-CO<sub>2</sub>-klimaateffecten zijn fors: in de internationale literatuur wordt geschat dat de opwarmende effecten van onder andere contrails en NO<sub>x</sub> gemiddeld twee keer zo groot zijn als die van CO<sub>2</sub>. De niet-CO<sub>2</sub>-klimaateffecten zijn afhankelijk van de atmosferische omstandigheden op koershoogte en zijn gemiddeld groter voor lange vluchten omdat deze vluchten een grotere gemiddelde koershoogte kennen (Dahlmann et al., 2021). Omdat Eindhoven Airport als regionale luchthaven relatief veel kortere (intra-Europese) vluchten bedient, is de niet-CO<sub>2</sub>-factor kleiner dan het mondiaal gemiddelde. In deze

studie is met een modellering van de niet-CO<sub>2</sub>-effecten met het ANCO-model (CE Delft, 2023a) specifiek voor de vluchten vanaf Eindhoven Airport in 2030 een niet-CO<sub>2</sub>-factor van 2,1 gevonden<sup>8</sup>. Het extra bijmengen van SAF verkleint de contrailvorming van de niet-CO<sub>2</sub>-effecten. In de lage (70%) ERF-variant is dit 30 kton CO<sub>2</sub>e, in de hoge (93%) ERF-variant 21 kton CO<sub>2</sub>e, dit is volgens de GWP100-metriek. In Bijlage A wordt een gedetailleerde beschrijving van de niet-CO<sub>2</sub>-klimaateffecten van de luchtvaart gegeven en wordt de rekenmethode van deze studie toegelicht.

Naast klimaateffecten zijn er ook gezondheidseffecten door de uitstoot van luchtverontreinigende stoffen van luchtvaart. Hierbij wordt vaak gekeken naar de Landing-Take-Off (LTO) emissies, dit zijn de emissies die worden uitgestoten bij de landing en vertrek tot ongeveer 1 kilometer vlieghoogte. De belangrijkste luchtverontreinigende stoffen CO, NO<sub>x</sub>, VOS, SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> en PM<sub>0,1</sub> zijn meegenomen in deze analyse. Tabel 5 toont het effect van het extra bijmengen van SAF in de lage en hoge ERF-variant op de emissies van luchtverontreinigende stoffen.

<sup>8</sup> Op basis van het netwerk van Eindhoven Airport berekent ANCO een CO<sub>2</sub>-equivalentiefactor van 2,9. Echter geeft ANCO voor alle mondiale vluchten een gemiddelde waarde van 4,0, waarmee ANCO een significant hogere waarde geeft dan de vaak gebruikte CO<sub>2</sub>e factor van 3,0 (corresponderend met de 2/3 klimaatimpact van non-CO<sub>2</sub> van Lee et al (2021). Om hiervoor te corrigeren is de ANCO-uitkomst voor Eindhoven Airport lineair geschaald waardoor de CO<sub>2</sub>e-factor reduceert naar 2,1.

Tabel 5 - Effect extra bijmengen SAF op emissies van luchtverontreinigende stoffen (tonnen)

		Lage (70%) ERF	Hoge (93%) ERF
Koolstofoxide	CO	-3,86	-2,64
Stikstofoxiden <sup>9</sup>	NO <sub>x</sub>	-	-
Vluchtige organische stoffen	VOS	-1,97	-1,35
Zwaveldeioxide	SO <sub>2</sub>	-0,67	-0,46
Fijnstof	PM <sub>10</sub>	-0,31	-0,21
Ultrafijnstof	PM <sub>0,1</sub>	-0,04	-0,03

## 5.4 Monetariseren baten

Om de baten vergelijkbaar te maken met de kosten, worden deze gemonetariseerd, dat wil zeggen, in geld uitgedrukt. Dat kan door middel van het gebruiken van milieuprijzen. In de basis is het idee van milieuprijzen dat deze de welvaartsverliezen weergeven die optreden indien er één extra kilogram van een stof in het milieu terecht komt. Welvaartsverliezen zijn bijvoorbeeld een verslechtering in menselijke gezondheid, ecosysteemdiensten, kapitaal-goederen, grondstoffen en welbevinden.

<sup>9</sup> Stikstofuitstoot wordt voornamelijk beïnvloed door de verbrandingskamer van de vliegtuigmotor. Het type brandstof heeft geen meetbare invloed op de stikstofuitstoot (Harlass et al., 2024).

Hieronder beschrijven we op basis van welke bronnen de maatschappelijke baten zijn gemonetariseerd.

## CO<sub>2</sub>

Voor het monetariseren van CO<sub>2</sub> is een CO<sub>2</sub>-milieuprijs nodig. Methodologisch ideaal zou het juist zijn om hiervoor een CO<sub>2</sub>-prijs te nemen die de schade weergeeft van het uitstoten van één extra ton CO<sub>2</sub>. Een aantal inschattingen van schadekosten vanuit de recente literatuur zijn weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6 - Schadekosten voor CO<sub>2</sub> in 2030 uit recente literatuur (€/tCO<sub>2</sub>)<sup>10</sup>

Literatuur	Prijs (€/ton)
Bressler (2021) DICE + human mortality	232
Moore, Diaz (2015) DICE + productivity labour/capital	207
Liu et al. (2022) equity weights	262
Barrage and Nordhaus (2023) DICE + equity weights	437
US government GIVE + 2% discount	167
Ricke et al. (2018) + GDP effects	375
Bilal and Känzig (2024) + GDP effects	950

Bron: (CE Delft, 2023b)

Zoals te zien is, lopen schattingen van de schadekosten van CO<sub>2</sub> momenteel nog erg ver uiteen. Elke studie doet net andere aannames of neemt andere schades mee. Deze grote onzekerheid wordt ook erkend in de wetenschappelijke

literatuur. Daarom wordt er vaak in de praktijk gekozen voor een aanpak waarin gebruik wordt gemaakt van preventie-kosten. Hierbij wordt uitgerekend wat de marginale kosten zijn van de reductie van een ton CO<sub>2</sub> voor het behalen van een gekozen beleidsdoel. In Tabel 7 worden een aantal veel-gebruikte preventiekosten weergegeven.

Tabel 7 - Preventiekosten voor CO<sub>2</sub> voor 2030 (€<sub>2023</sub>/tCO<sub>2</sub> inclusief btw)

Beleidsdoel/scenario	Prijs (€/ton)
WLO Laag (3,75 °C)	30
WLO Hoog (2,75 °C)	119
WLO onzekerheidsverkenning (2 °C ondergrens)	150
WLO onzekerheidsverkenning (2 °C centrale waarde HBM 2017)	193
WLO onzekerheidsverkenning (2 °C bovengrens)	750
Handboek Milieuprijzen 2023 (1,5 °C)/IPCC 2018 (1,5 °C with limited overshoot)	252

Bron: (CE Delft, 2023b)

Volgens het internationaal erkende Klimaatakkoord van Parijs moet de gemiddelde mondiale temperatuurstijging ruim onder de 2 °C blijven, met inspanningen om de stijging te beperken tot 1,5 °C. In lijn hiermee is voor deze studie gekozen voor een 1,5 °C-prijspad. We sluiten hiervoor aan bij het advies uit het Handboek Milieuprijzen 2023, gebaseerd op het 1,5 °C with limited overshoot-scenario van IPCC (2018). De gebruikte CO<sub>2</sub>-prijs is € 252 per ton CO<sub>2</sub>.

<sup>10</sup> Prijzen zijn omgerekend van US dollar naar euro met een koers van € 0,90/\$US.

## Niet-CO<sub>2</sub>

De waardering van niet-CO<sub>2</sub> is een onderwerp waar nog veel discussie over is. Niet-CO<sub>2</sub> heeft een ander karakter dan CO<sub>2</sub> doordat de tijdshorizon waarover de effecten plaatsvinden veel korter is. CO<sub>2</sub> blijft duizenden jaren in de atmosfeer en draagt daarmee voor een lange tijd bij aan het opwarmen van de aarde. Niet-CO<sub>2</sub> daarentegen verblijft veel korter in de atmosfeer en varieert van enkele uren voor contrails (vliegtuigstrepen) tot tientallen jaren voor andere stoffen. Bovendien zijn de klimaateffecten afhankelijk van de locatie van de uitstoot, het moment van de dag en de actuele atmosferische omstandigheden.

Daarnaast zijn de preventiekosten voor niet-CO<sub>2</sub> in principe significant lager dan voor CO<sub>2</sub>. Bijvoorbeeld Teoh et al. (2020) laat zien dat met het selectief laten omvliegen van 1,7% van de wereldwijde vloot een reductie van 59% van de contrail-EF kan plaatsvinden, met maar 0,014% meer brandstofverbruik en CO<sub>2</sub>-emissies. Echter moet ook gezegd worden dat er verschillende meningen zijn in het wetenschappelijk debat of het wenselijk is extra CO<sub>2</sub> uit te stoten voor een reductie in niet-CO<sub>2</sub>, omdat de CO<sub>2</sub> veel langer in de atmosfeer verblijft en dus langer bijdraagt aan opwarming van de aarde.

Omdat deze discussie nog niet beslecht is, is voor de niet-CO<sub>2</sub>-waardering in deze studie dezelfde prijs aangenomen als voor CO<sub>2</sub>-emissies.

## Luchtverontreinigende stoffen

De uitstoot van luchtverontreinigende stoffen tijdens de starts, landingen en het taxiën op de grond heeft een effect op de luchtkwaliteit in de directe omgeving van de luchthaven en daarmee op de gezondheid van omwonenden en op de natuur in de omgeving van de luchthaven. Om deze effecten te moneteriseren sluiten we aan bij de geadviseerde prijzen uit het Handboek Milieuprijzen 2023 (CE Delft, 2023b). De gebruikte milieuprijzen staan weergegeven in Tabel 8.

Tabel 8 - Milieuprijzen luchtverontreinigende stoffen

Stof		Milieuprijs (€/kg)
Koolstofdioxide	CO	0,15
Stikstofoxiden (zowel effect op gezondheid als natuurkwaliteit)	NO <sub>x</sub>	33,14
Vluchtige organische stoffen	VOS	2,95
Zwaveldeioxide	SO <sub>2</sub>	57,96
Fijnstof	PM <sub>10</sub>	128,29
Ultrafijnstof	PM <sub>0,1</sub>	477,11

Bron: (CE Delft, 2023b)

## 5.5 Onzekerheden bij kosten en baten

Om de kosten en baten te berekenen zijn aannames nodig. Voor de cruciale aannames worden in deze paragraaf de effecten op de uitkomsten beschreven. Tabel 9 geeft een



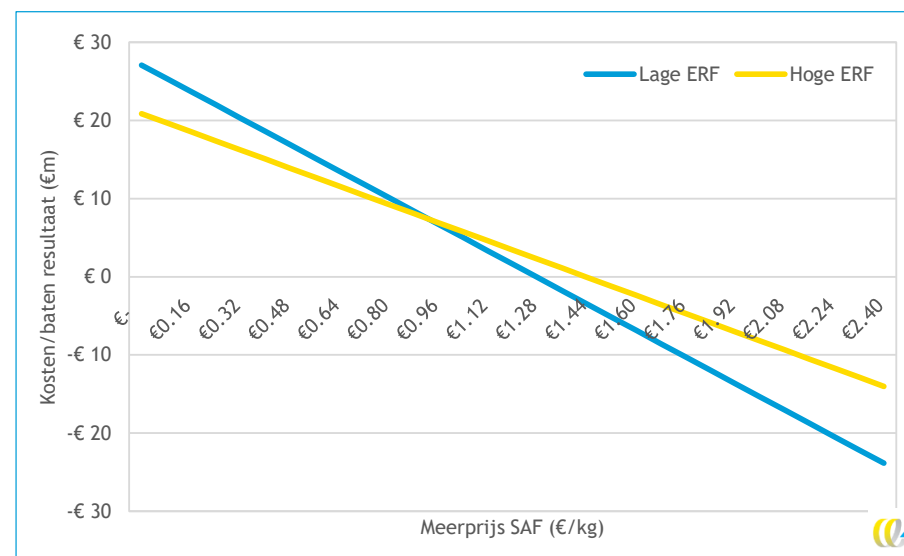
overzicht van de belangrijkste aannames, hoe onzeker de aannames zijn, hoe groot hun effect is op het resultaat en hoe daar in deze studie mee is omgegaan.

Tabel 9 - Belangrijkste aannames, de onzekerheid, hun effect op de kosten-baten in deze studie en gebruikte methode

Aanname	Onzekerheid	Effect	Methode
<b>Kosten</b>			
Prijs SAF t.o.v. kerosine	Groot	Groot	Onzekerheidsanalyse met SAF-prijs van 1x tot 4x de kerosineprijs (€ 0,80/kg)
EU ETS- en CORSIA-prijs	Redelijk	Redelijk	Aangesloten bij recent onderzoek
EU SAF allowances	Groot	Redelijk	Conservatieve inschatting door deze niet mee te nemen als potentieel significant kostenverlagend
Subsidie Eindhoven Airport	Klein	Klein	
<b>Baten</b>			
CO <sub>2</sub> ERF SAF	Redelijk	Redelijk	Twee varianten 70 en 93%
CO <sub>2</sub> en niet-CO <sub>2</sub> -prijs	Groot	Groot	Preventiekosten in lijn met 1,5°C (IPCC, 2018)
Niet-CO <sub>2</sub> -equivalentiefactor	Groot	Redelijk	Gemodelleerd specifiek voor Eindhoven Airport met ANCO-model, onzekerheid aangegeven volgens Lee et al (2021).
Niet-CO <sub>2</sub> ERF SAF	Redelijk	Redelijk	Op basis van recente literatuur is een puntschatting van 21% gemaakt
Luchtverontreinigende stoffen prijzen en reductiefactoren	Groot	Klein	

Vooraf de ontwikkeling van de SAF-prijs is een belangrijke factor voor het kosten-batenresultaat. In Figuur 5 is de afhankelijkheid van het resultaat weergegeven ten opzichte van een SAF-prijs van 1 keer (€ 0 meerprijs per kg) tot 4 keer (€ 2,40 meerprijs per kg) de fossiele kerosineprijs voor zowel een lage als een hoge ERF.

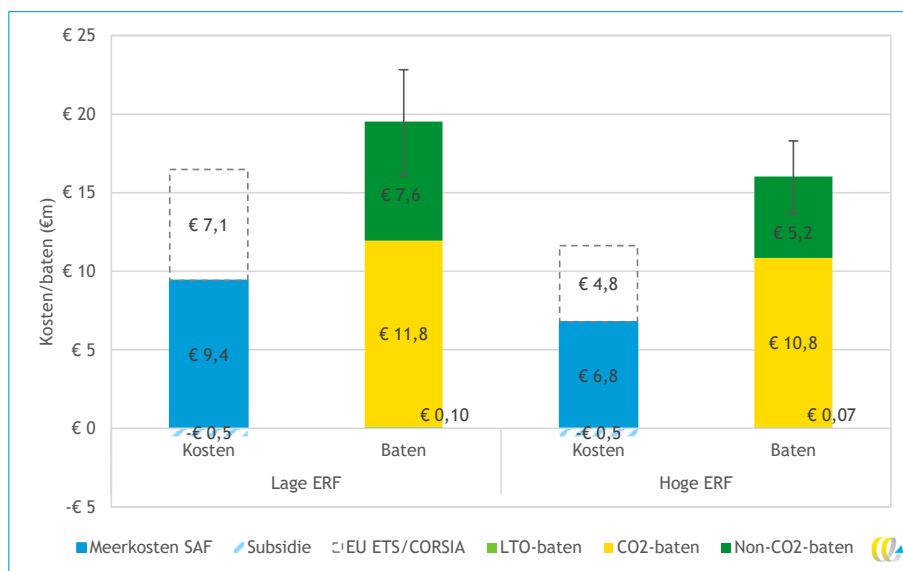
Figuur 5 - Afhankelijkheid kosten/baten resultaat van de meerprijs SAF in 2030



Uit deze onzekerheidsanalyse blijkt dat het kosten-batenresultaat negatief wordt bij een meerprijs voor SAF groter dan € 1,28/kg voor de lage ERF SAF en € 1,44 voor de hoge ERF SAF. Met de aangenomen kerosineprijs van €0,80/kg betekent

dit dat SAF respectievelijk maximaal 2,6 keer tot 2,8 keer zo duur mag zijn als kerosine. Als de SAF in 2030 duurder is dan dit, is de extra SAF-bijmengmaatregel niet kostenefficiënt. Echter, ook al zou de maatregel niet kostenefficiënt zijn dan nog helpt de maatregel bij het opschalen van SAF-productie en -gebruik.

**Figuur 6 - Kosten en baten van het extra SAF bijmengen op Eindhoven Airport in 2030 voor een lage (70%) en hoge (93%) emissiereductiefactor, waarbij SAF twee keer zoveel kost als kerosine**

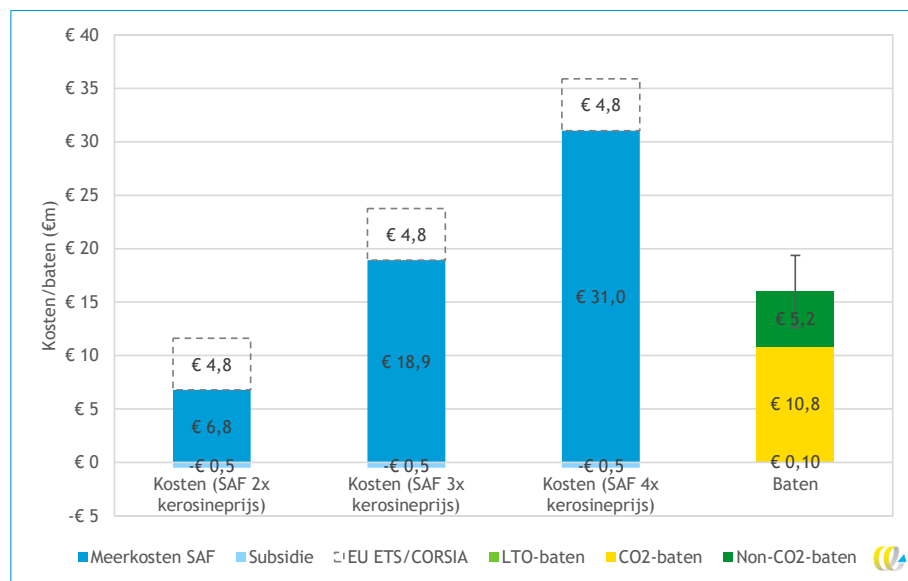


De vergelijking van kosten en baten voor verschillende ERFs is weergegeven in Figuur 6. Omdat bij een hogere ERF de bijmenging van 6% SAF zorgt voor een grotere emissie-

reductie, is de opgave voor de aanvullende SAF-bijmenging kleiner. Hierdoor dalen bij dezelfde SAF-prijs (aangenomen is in dit geval dat deze twee keer zo hoog is als de kerosineprijs) de kosten maar ook de baten. Voor de baten zijn twee aspecten relevant, de lagere resterende opgave die leidt tot iets lagere CO<sub>2</sub>-baten en het lagere bijmengpercentage dat nodig is om dezelfde absolute emissiereductie te realiseren en leidt tot een significante reductie in de niet-CO<sub>2</sub>-baten. Hierbij is de aanname cruciaal dat de reductie van contrails lineair afhangt van het SAF-bijmengpercentage en dat is lager bij een hoge ERF.

In Figuur 7 worden voor een hoge ERF analoog aan Figuur 4 voor een lage ERF de effecten van de verschillende SAF-prijzen op de kosten-baten vergeleken. De hoge ERF lijkt de auteurs van deze studie zeer optimistisch. Realistisch is vermoedelijk een gemiddelde ERF iets hoger dan de minimale vereiste van de RED (65%), zolang HEFA de meest voor-komende SAF-productieroute is.

Figuur 7 - Kosten en baten van het extra SAF bijmengen op Eindhoven Airport in 2030 bij een SAF emissiereductiefactor van 93%



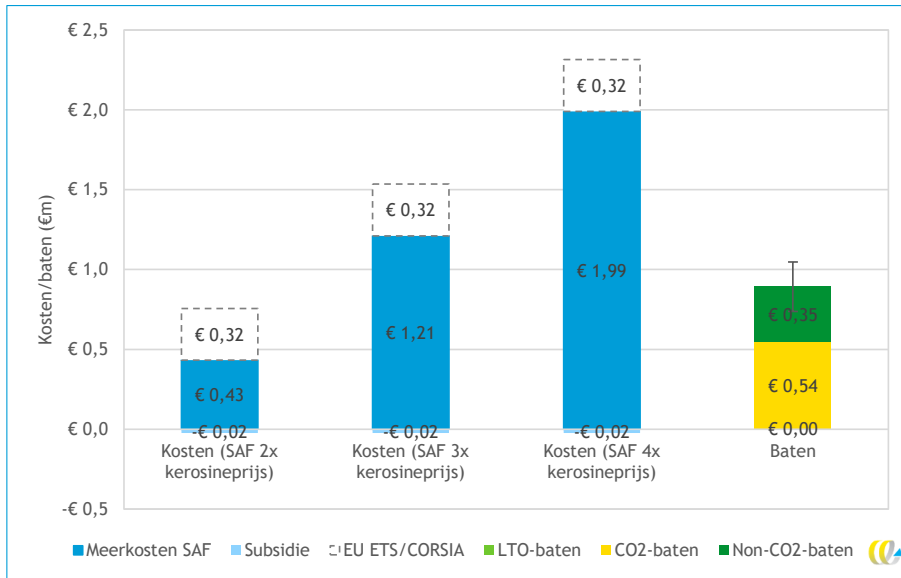
Ook is het mogelijk dat de andere verduurzamingsmaatregelen van Eindhoven Airport meer of minder gaan opleveren of dat er veranderingen in het netwerk en in de operatie van airlines optreden. Hierdoor zal de hoeveel CO<sub>2</sub>-reductie die door extra SAF bijmengen gerealiseerd moet worden (zoals berekend in Hoofdstuk 3) veranderen.

Mocht de vlootvernieuwing trager lopen dan verwacht, langere afstanden worden gevolgen of minder verbetering in de operatie van het luchtruim kunnen worden behaald, zal een hoger percentage bijmenging benodigd zijn. Als de

aangenomen vlootverzwaring trager dan aangenomen verloopt, zorgt dat voor minder brandstofverbruik en is minder bijmenging nodig. Bij gelijke omvliegafstand in het luchtruim in 2030 als in 2019 wordt bijvoorbeeld verwacht dat 2-3 procentpunt meer SAF-bijmenging nodig blijkt. In het geval geen volledige vlootvernieuwing wordt behaald en klein verkeer niet kan worden uitgesloten (volledig mer-2b-scenario voor 2030), is de verwachting dat 1 procentpunt meer SAF-bijmenging nodig is om aan de doelstelling voor 2030 te voldoen. Mocht de meest gevlogene route (de 5% vluchten naar Londen Stansted) worden vervuld met een 5 keer zo lange route (bijvoorbeeld naar Málaga) is de verwachting dat 3-4 procentpunt meer SAF-bijmenging benodigd is.

Al deze variabelen hebben vooral effect op de hoeveelheid SAF die bijgemengd moet worden en dus op de hoogte van de kosten en baten. Zowel de kosten en de baten gaan allebei omhoog of omlaag. Echter, is de impact op de verhouding van kosten en baten beperkt omdat de meeste effecten lineair schalen. Dit wordt duidelijk in Figuur 8, waarin de maatschappelijke kosten en baten zijn berekend bij 1 procentpunt meer SAF bijmengen op Eindhoven Airport voor een ERF van 70%.

Figuur 8 - Maatschappelijke kosten en baten bij 1 procentpunt meer SAF bijmengen en een ERF van 70%



kosten zullen leiden tot hogere brandstofprijzen voor airlines die vanaf Eindhoven Airport vliegen. Hierdoor stijgen de operationele kosten van luchtvaartmaatschappijen en bestaat de mogelijkheid dat zij hun operaties van Eindhoven aanpassen door bijvoorbeeld minder vanaf de luchthaven te vliegen of hun bestemmingennetwerk aan te passen. Op deze effecten wordt in dit rapport niet ingegaan.

Een vervolgvraag is hoe de airlines omgaan met de hogere kosten. Om de maximale effecten voor passagiers in kaart te brengen, zijn de effecten op de ticketprijzen van passagiers vanaf Eindhoven Airport berekend door de extra kosten 100% door te berekenen. Dit is gedaan voor zes voorbeeldreizen (zie Tabel 10):

- de drie bestemmingen met het meeste vliegverkeer, welke tevens de kortste route bevat;
- de langste route met een bestemming binnen de EEA;
- de langste route met een bestemming buiten de EEA.

## 5.6 Effect op ticketprijzen

In de kosten-batenanalyse zijn de extra kosten en de maatschappelijke baten beschreven en gekwantificeerd. Een belangrijk aspect dat niet aan bod komt in een dergelijke analyse is dat de kosten en baten effect hebben op verschillende stakeholders. De baten zijn met name voor het klimaat en in die zin is de aarde en de mensheid in zijn geheel de stakeholder. Bij de kosten is dat heel anders. De meer-

Tabel 10 - Basiskenmerken van de voorbeeldroutes, bij gemiddeld aantal passagiers is rekening gehouden met de gemiddelde bezettingsgraad op de route

Route	Bestemming	Vliegafstand [km]	Aantal vluchten	Gemiddeld aantal passagiers	Brandstof-behoefte per passagier [kg]
Meest gevlogen en kortste	Stansted	368	1.019	158	10,2
Op 1 na meest gevlogen	Malaga	1.866	874	170	34,2
Op 2 na meest gevlogen	Alicante	1.577	848	170	29,0
Langste (intra-EEA)	La Palma	3.241	58	171	58,4
Langste (extra-EEA)	Sal (CV)	4.636	84	171	80,8

Hierbij is uitgegaan van het huidige netwerk van Eindhoven Airport, zoals de huidige grootte en brandstofefficiëntie van de toestellen op Eindhoven Airport. Het verschil tussen de bestemmingen binnen en buiten de EEA is opgenomen omdat de kostenreductie voor EU ETS-rechten (van toepassing voor bestemmingen in de EEA) veel groter zijn dan de kostenbesparingen voor CORSIA offsets (van toepassing voor bestemmingen buiten de EEA).

De effecten op de ticketprijzen zijn vooral afhankelijk van de meerprijs van SAF ten opzichte van fossiele kerosine. In dit voorbeeld is aangenomen dat SAF per kg 1,60 euro duurder is

dan fossiele kerosine (3 keer zo duur). Bovendien is met een ERF van 70% gerekend waardoor 22% extra SAF bijmenging nodig is. Voor de besparing bij EU ETS is met 130 euro per ton CO<sub>2</sub> gerekend en bij CORSIA met 4 euro per ton CO<sub>2</sub>. De uitkomsten zijn weergegeven in Tabel 11.

Tabel 11 - Meerprijs voor vliegtickets vanaf Eindhoven indien SAF drie keer zo duur is als kerosine bij een ERF van 70%

Bestemming	Meerprijs SAF (€)	Minder kosten EU ETS/CORSIA (€)	Meerprijs ticket (€)
Stansted	3,59	0,92	2,67
Malaga	12,04	3,09	8,95
Alicante	10,21	2,62	7,59
La Palma	20,56	5,28	15,28
Sal (CV)	28,44	0,22	28,22

Voor de meest voorkomende route naar London Stansted stijgen de ticketprijzen in dit voorbeeld met 2,67 euro. Voor Malaga en Alicante stijgen de ticketprijzen met resp. 8,95 euro en 7,59 euro. Voor de Europese bestemmingen is de grootste stijging 15,28 euro naar La Palma.

De grootste toename in ticketprijzen wordt verwacht naar Sal in Kaapverdië met 28,22 euro. Dit komt omdat deze bestemming niet onder het EU ETS valt en voor CO<sub>2</sub>-emissies onder CORSIA ook in 2030 waarschijnlijk nog significant lagere kosten zijn. Hierdoor wordt een veel kleiner deel van de meerkosten voor SAF gecompenseerd dan bij bestemmingen binnen de EER.

Naarst de puntschatting voor de meerkosten per vliegticket is ook een range van de mogelijke aanvullende kosten berekend. Hierbij zijn de SAF-meerkosten gevarieerd tussen een factor 2 en 4 ten opzichte van kerosine in combinatie met ERF's tussen 70 en 93%. De minimale prijsstijging ontstaat bij een ERF van 93% in combinatie met SAF dat twee keer zo duur is als kerosine en de maximale prijsstijging bij een ERF van 70% in combinatie SAF dat vier keer zo duur is als kerosine. Voor de Europese bestemmingen variëren de meerkosten tussen 0,60 euro en 25,56 euro. Voor Sal kunnen de meerkosten oplopen tot 42,44 euro. De bandbreedtes voor de individuele bestemmingen uit Tabel 11 zijn:

- London Stansted: 0,60 euro tot 4,46 euro extra;
- Malaga: 2,00 euro tot 14,97 euro extra;
- Alicante: 1,69 euro tot 12,69 euro extra;
- La Palma: 3,41 euro tot 25,56 euro extra;
- Sal (CV): 9,54 euro tot 42,44 euro extra.

## 6 Referenties

- Bräuer, T., Voigt, C., Sauer, D., Kaufmann, S., Hahn, V., Scheibe, M., Schlager, H., Huber, F., Clercq, P.L., Moore, R.H., & Anderson, B.E. (2021). Reduced ice number concentrations in contrails from low-aromatic biofuel blends. *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 16817-16826.
- Brouwer, R., Faleiros, D.E., Reekers, M., Wijn, L., Söffing, L., & Haan, W.d. (2024). *Influence of Hydrogen and the composition of SAF to non-CO2 climate effects*.
- CE Delft. (2022). *Impacts of a CO2 ceiling for Dutch aviation - version September 2022*.
- CE Delft. (2023a). *Aviation non-CO2 estimator (ANCO) - A tool for quantifying the non-CO2 climate impact of aviation*.
- CE Delft. (2023b). *Handboek Milieuprijzen 2023. Methodische onderbouwing van kengetallen gebruikt voor waardering van emissies en milieu-impacts*.
- CE Delft. (2024). *Carbon budget aviation*.
- Dahlmann, K., Grewe, V., Matthes, S., & Yamashita, H. (2021). Climate assessment of single flights: Deduction of route specific equivalent CO2 emissions. *International Journal of Sustainable Transportation*, 1-12. <https://doi.org/10.1080/15568318.2021.1979136>
- Dahlmann, K.e.a. (2023). Climate assessment of single flights: Deduction of route specific equivalent CO2 emissions. *International Journal of Sustainable Transportation*, 17(1).
- EASA. (2020). *Scientific understanding of CO2 and non-CO2 climate effects*.
- EASA. (2022). *European Aviation Environmental Report*.
- EASA. (2024). SAF policy actions. In: EASA.
- EC. (2021). *Study supporting the impact assessment of the ReFuelEU Aviation initiative*.
- Eindhoven Airport. (2024). Versneld verduurzamen richting 2030: 30% minder geluid én CO2. In.
- Grewe, V.S., A. (2008). AirClim: an efficient tool for climate evaluation of aircraft technology. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(16), 4621-4639.
- Harlass, T., Dischl, R., Kaufmann, S., Märkl, R., Sauer, D., Scheibe, M., Stock, P., Bräuer, T., Dörnbrack, A., Roiger, A., Schlager, H., Schumann, U., Schripp, T., Grein, T., Bondorf, L., Renard, C., Gauthier, M., Johnson, M., Luff, D., . . . Voigt, C. (2024). Measurement report: In-flight and ground-based measurements of nitrogen oxide emissions from latest generation jet engines and 100% sustainable aviation fuel. *EGUsphere*, 2024, 1-22. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-454>
- IATA. (2023). *Sustainable aviation fuel output increases, but volumes still low*.
- IATA. (2024). *SAF Production to Triple in 2024 but More Opportunities for Diversification Needed*. <https://www.iata.org/en/pressroom/2024-releases/2024-06-02-03/>
- IPCC. (2018). *Global Warming of 1,5 Degrees*.
- Lee, D.S., Fahey, D.W., Skowron, A., Allen, M.R., Burkhardt, U., Chen, Q., Doherty, S.J., Freeman, S., Forster, P.M., Fuglestvedt, J., Gettelman, A., De León, R.R., Lim, L.L., Lund, M.T., Millar, R.J., Owen, B., Penner, J.E.,

- Pitari, G., Prather, M.J., & Wilcox, L.J. (2021). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, 2021.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>
- Ministerie van I&W. (2022). *Schriftelijk overleg n.a.v. verslag Transportraad d.d. 2 juni 2022*. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.  
[https://www.eerstekamer.nl/nonav/bijlage/20220913/schriftelijk\\_overleg\\_over\\_verslag/document3/f=/vlwbg\\_e3pgtt3.pdf](https://www.eerstekamer.nl/nonav/bijlage/20220913/schriftelijk_overleg_over_verslag/document3/f=/vlwbg_e3pgtt3.pdf)
- NLR. (2024a). *CO2 reduction targets for Amsterdam Airport Schiphol based on remaining IPCC CO2 budgets up to 2050*.
- NLR. (2024b). *Luchtkwaliteit en stikstofdepositie rond militaire luchthaven Eindhoven*.
- NLR, & SEO. (2021). *Destination 2050: A Route to Net-Zero European Aviation*.
- SEO, CE Delft, & Significance. (2023). *Schiphol: krimpen of verduurzamen?*
- SEO & NLR. (not published yet). *Destination 2050*.
- Teoh, R., Schumann, U., Majumdar, A., & Stettler, M.E.J. (2020). Mitigating the Climate Forcing of Aircraft Contrails by Small-Scale Diversions and Technology Adoption. *Environmental Science & Technology*, 2020(5), 2941-2950.  
<https://doi.org/10.1021/acs.est.9b05608>
- Teoh, R.e.a. (2022). Targeted Use of Sustainable Aviation Fuel to Maximize Climate. *Environmental Science & Technology*, 56, 17246-17255.
- Yin, F.e.a. (2023). Predicting the climate impact of aviation for en-route emissions: the algorithmic climate change function submodel ACCF 1.0 of EMAC 2.53. *Geoscientific Model Development*, 16(11), 3313-3334.





# Bijlagen



# A Niet-CO<sub>2</sub>-effecten

Naast CO<sub>2</sub> komen er bij verbranding van kerosine in een vliegtuigmotor (gasturbine) ook andere gassen en deeltjes vrij. Dit zijn emissies van stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>), roetdeeltjes (nvPM), zwaveloxiden (SO<sub>x</sub>), en waterdamp (H<sub>2</sub>O). Deze emissies hebben op de grond een effect op de luchtkwaliteit en op de kruishoogte van vliegtuigen een effect op het klimaat. Op kruishoogte hebben deze emissies zowel chemische als fysische invloeden op de atmosfeer die bijdragen aan klimaatverandering. Deze emissies worden ook wel 'niet-CO<sub>2</sub>-klimaat effecten van luchtvaart' genoemd. Een rapport opgesteld voor EASA (2020) geeft een duidelijk overzicht hiervan.

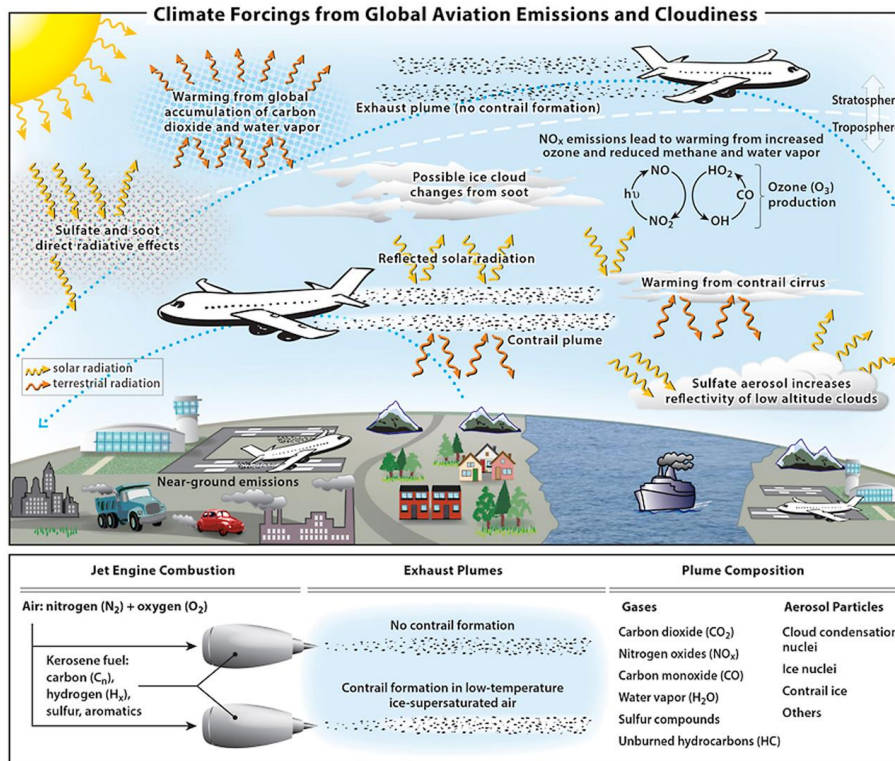
Om de baten van niet-CO<sub>2</sub>-klimaat effecten door extra gebruik van SAF te kunnen bepalen is het belangrijk om deze effecten te kunnen kwantificeren. Het voorspellen van de klimaat impact van niet-CO<sub>2</sub>-emissies is vergeleken met CO<sub>2</sub> een stuk complexer. De meest significante niet-CO<sub>2</sub>-effecten worden veroorzaakt door de uitstoot van stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>) en de formatie van condensatiesporen zoals omschreven door Lee et al (2021).

Figuur 9 geeft een overzicht van de belangrijkste processen. De uitstoot van NO<sub>x</sub> resulteert via een complex chemisch proces in verhoogde aanmaak van ozon en tegelijkertijd

afbraak van methaan. Ozon (O<sub>3</sub>) en methaan (CH<sub>4</sub>) zijn beide broeikasgassen, echter de impact van een verhoogde ozon-concentratie is over het algemeen groter dan de impact van een verlaagde concentratie methaan. Het resultaat van dit effect is dat NO<sub>x</sub>-uitstoot een opwarmend effect heeft op het klimaat. De mate ervan hangt echter af van de chemische samenstelling van de atmosfeer op de plek waar de stof wordt uitgestoten. Dit is moeilijk te voorspellen omdat de atmosfeer niet uniform is.

De uitstoot van fijnstof (nvPM) kan, in combinatie met uitstoot van waterdamp, resulteren in de formatie van een condensatiespoor (vliegtuigstreep). Waterdruppels binden zich aan de deeltjes, welke in de juiste omstandigheden kunnen transformeren tot ijskristallen.

Figuur 9 - Niet-CO<sub>2</sub>-klimaat effecten van de luchtvaart



Bron: Lee et al (2021).

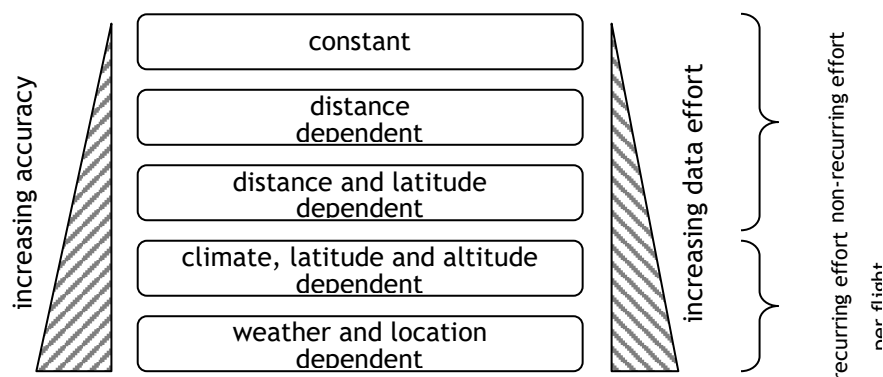
In sommige gevallen kan dit leiden tot de vorming van wolken, die enige tijd in de lucht kunnen blijven. Deze wolkvorming heeft twee effecten: binnenkomende zonnestraling wordt terug de ruimte in gekaatst en uitgaande straling wordt teruggekaatst richting het aardoppervlak. Of het netto-effect hiervan verwarmend of verkoelend is en de mate waarvan is

afhankelijk van veel factoren. Zo speelt het tijdstip op de dag een rol en hebben de lokale weersomstandigheden grote invloed op de mate waarin condensatiesporen ontstaan en hoe ze zich verder ontwikkelen. Langdurige condensatiesporen ontstaan vooral in koude en vochtige omstandigheden, ook wel Ice Super-Saturated Regions (ISSRs) genoemd. Waar deze gebieden voorkomen is weersafhankelijk en daarom moeilijk ver van tevoren te voorspellen.

Het feit dat de effecten van niet-CO<sub>2</sub>-emissies complex te voorspellen en te beoordelen zijn, maakt het ook moeilijk om de totale klimaatimpact van de vliegbewegingen van Eindhoven Airport te voorspellen. Waar de impact van CO<sub>2</sub>-uitstoot onafhankelijk is van tijd en locatie van emissie, is de impact van niet-CO<sub>2</sub> dit wel. Daarnaast hebben niet-CO<sub>2</sub>-effecten doorgaans een kortere levensduur dan de effecten van CO<sub>2</sub> waardoor de klimaatimpact van niet-CO<sub>2</sub> moeilijk te vergelijken is met die van CO<sub>2</sub>.

Er bestaan verschillende methodes om de klimaatimpact van niet-CO<sub>2</sub>-emissies te berekenen. De gekozen methode is hierbij een afweging tussen accuraatheid en inspanning, zoals geïllustreerd in Figuur 10. Hoe groter de gewenste nauwkeurigheid, hoe veelomvatter de berekening wordt.

Figuur 10 - Klimaatmitigatiepotentieel en vereiste inspanning van berekeningsmethoden voor CO<sub>2</sub>-equivalenten



Bron: (Niklaß, 2021)

De eenvoudigste methode is om een constante equivalentiefactor te gebruiken en deze te vermenigvuldigen met CO<sub>2</sub>-emissies. Deze methode is echter zeer grof en kent grote onzekerheidsmarges. De hoogte van deze factor wordt in het onderzoek van Dahlmann et al (2023) bepaald op 3,4. Dit onderzoek beschrijft verder een grote invloed van vliegafstand en breedtegraad van de vliegroute op de klimaatimpact van niet-CO<sub>2</sub>-emissies. Hierbij zijn empirische relaties bepaald waarmee voor drie niet-CO<sub>2</sub>-klimaat effecten (Contrails, NO<sub>x</sub>, en waterdamp) een equivalentiefactor te bepalen is. De ANCO-niet-CO<sub>2</sub>-estimator (CE Delft, 2023a) is eveneens een model waarmee equivalentiefactoren voor niet-CO<sub>2</sub>-effecten bepaald kunnen worden op basis van vliegafstand en breedtegraad. ANCO neemt daarnaast het vliegtuigtype mee als variabele.

Wanneer een grotere nauwkeurigheid vereist is, kan een klimaatafhankelijk model worden gebruikt. AirClim (Grewe, 2008) is hier een voorbeeld van. Hierin geldt ook de vlieghoogte als variabele. Voor niet-CO<sub>2</sub>-klimaat effecten geldt dat deze over het algemeen sterker zijn op grotere vlieghoogtes dan op lagere vlieghoogtes. Dit effect wordt in een tool zoals AirClim wel meegenomen, terwijl dit in eerdergenoemde methodes niet het geval is. Nadeel van dit model is dat op het moment van schrijven, deze nog niet openbaar is en daarom niet te gebruiken is voor deze studie.

De hoogste mate van nauwkeurigheid wordt behaald in een weersafhankelijke modellering. De algorithmic climate change functions (aCCFs), ontwikkeld door Yin et al (2023), zijn hier een voorbeeld van. Deze methode neemt de effecten van weersomstandigheden mee. Dit zorgt enerzijds voor de meest accurate voorspelling, anderzijds zorgt deze voor de grootste mate van inspanning. Dit maakt de methode vooral geschikt om op vluchtniveau analyses uit te voeren.

Om voor Eindhoven Airport een voorspelling te doen van de niet-CO<sub>2</sub>-effecten van het volledige vliegverkeer met aCCFs, zouden alle vluchten individueel moeten worden door-gerekend. Daarnaast is de verwachting dat een analyse van een heel jaar aan vluchten zou leiden tot gemiddelde resultaten op gebied van niet-CO<sub>2</sub>-effecten. Deze gemiddelde resultaten zijn eveneens te genereren met een eenvoudiger model dat een klimaat gebaseerde benadering toepast.

Er is geconstateerd dat deze vorm van berekenen te intensief is en dat deze aan het doel van de studie voorbijgaat.

Een geschikte methode dient ook de mogelijkheid te hebben om het effect van een andere brandstof (SAF ten opzichte van fossiele kerosine) te kunnen bepalen. ANCO is in staat om de effecten van meer of minder SAF-bijmenging mee te nemen. Dit gebeurt op lineaire basis. Het belangrijkste effect bij de vermindering van de niet-CO<sub>2</sub>-effecten komt door de lagere bijdrage van aromaten in SAF, waardoor de formatie van contrails met 26% van afneemt ((Bräuer et al., 2021), (CE Delft, 2023a)) Door op basis van Lee et al (2021) rekening te houden met het gemiddelde aandeel van contrails aan het totale niet-CO<sub>2</sub>-klimaat-effect, is berekend dat bij gebruik van 100% SAF de impact van niet-CO<sub>2</sub>-klimaat-effecten met 21% afneemt ten opzichte van fossiele kerosine.

Onderzoeken van bijvoorbeeld Teoh et al (2022) beschrijven dat de relatie tussen bijmengpercentage van SAF en niet-CO<sub>2</sub>-klimaatimpact non-lineair is en dat er met hogere bijmengpercentages relatief meer reductie plaats kan vinden. Deze relatie is echter vooral lineair bij hogere bijmengpercentages (> 50%) en het verschilt bovendien per type brandstof hoe deze relatie precies samenhangt.

In een studie naar de invloed van de samenstelling van SAF op niet-CO<sub>2</sub>-effecten van het NLR (Brouwer et al., 2024) is de niet-CO<sub>2</sub>-klimaatimpact van verschillende SAF-types geanalyseerd. Een van deze SAF-types is HEFA, waarvan de

verwachting is dat deze extra geleverd kan worden door de brandstofleveranciers van Eindhoven Airport. Voor dit type SAF is een quasilineaire relatie met niet-CO<sub>2</sub>-klimaatimpact gevonden bij bijmengpercentages tussen 6 en 50%, waardoor de aanname van ene lineaire relatie voor deze studie als valide kan worden beschouwd voor dit type SAF.

Omdat ANCO de beste balans biedt tussen nauwkeurigheid en inspanning en variatie in SAF-bijmenging meeneemt in de modellering, is de ANCO gekozen als model om de niet-CO<sub>2</sub>-effecten te berekenen.

# B Overzicht vloot Eindhoven airport 2030

In Tabel 12 is een overzicht weergegeven van de aangenomen vloot voor 2030 voor Eindhoven Airport. Deze prognose is geabuseerd op mer-scenario 2b, waarna volledige vlootvernieuwing en vlootverzwaring is toegepast. Onder de 'overige' maatschappijen vallen Corendon, Freebird, Pegasus, Pobeda Sun Express en TUI.

Tabel 12 - Overzicht van de aangenomen vloot op Eindhoven Airport in 2030

Luchtvaartmaatschappij	Toestel	Aantal vertrekkende vliegbewegingen
Ryanair	B38M	8.193
Transavia	A20N	2.075
Transavia	A21N	4.150
Wizz Air	A21N	4.317
Overig	A21N	242
Overig	B39M	1.273
<b>Totaal</b>	-	<b>20.250</b>

# Colofon

Delft, CE Delft, december 2024

Deze publicatie is geschreven door:

Stefan Grebe

Merit Heijink

Christiaan Meijer

Matthijs Reekers (NLR)

Liesbeth Wijn (NLR)

Publicatienummer: 24.240319.177

Opdrachtgever: Eindhoven Airport N.V.

Alle openbare CE-publicaties zijn verkrijgbaar via [www.ce.nl](http://www.ce.nl)

© copyright, CE Delft, Delft



## CE Delft

Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toon-aangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al sinds 1978 werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.