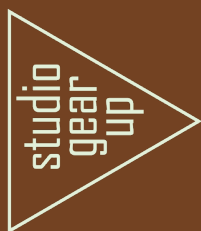


Hernieuwbare waterstof voor luchtvaart- brandstoffen in Nederland

Vraag naar hernieuwbare waterstof in
Nederland

Eindrapport



December 2022

Hernieuwbare waterstof voor luchtvaart- brandstoffen in Nederland

Vraag naar hernieuwbare waterstof in Nederland

Datum: 20 december 2022
Door:
In opdracht van: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat,
Afdeling Duurzame Luchtvaart

© studio Gear Up B.V., 2022

Adres: Cruquiusweg 111-A
1019 AG Amsterdam
+31-20-2117205
info@studiogearup.com
www.studiogearup.com

Managementsamenvatting

Gezien de komende ReFuelEU Aviation verordening en de Luchtvaartnota heeft de directie Luchtvaart van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat behoefte aan inzicht in de hoeveelheid waterstof die nodig is voor de luchtvaartsector in Nederland in de periode tot 2050. In deze studie is onderzocht hoeveel waterstof nodig is voor de raffinage van duurzame vliegtuigbrandstoffen (Sustainable Aviation Fuels - SAF)¹ en voor waterstofvliegtuigen.

Uit onze analyses blijkt dat de doelen van ReFuelEU Aviation tot een grote vraag naar hernieuwbare waterstof leidt, en daarmee ook een additionele vraag naar hernieuwbare elektriciteitsproductie veroorzaakt. In 2030 is er voor de invulling van ReFuelEU Aviation in totaal 3,2 PJ waterstof nodig, waarvan in ieder geval 2,1 PJ hernieuwbaar moet zijn (namelijk voor de productie van e-SAF; voor de waterstof die nodig is in de productie van bio-SAF stelt regelgeving nog geen eis aan de hernieuwbaarheid ervan). Realisatie van de Nederlandse Luchtvaartnota zou tot een waterstofvraag van 5,4 PJ in 2030 leiden. Zie onderstaande tabel.

Tabel 1. Samenvatting van de resultaten van deze studie. De resultaten geven we weer in petajoule (PJ) voor de vereiste hoeveelheden duurzame vliegtuigbrandstof (SAF), waarvan een deel biobrandstof (bio-SAF) en een ander deel e-brandstof (e-SAF) is; voor de totale waterstofvraag voor de raffinage van SAF en waterstofvliegtuigen, en de minimale vraag naar hernieuwbare waterstof. De vereiste opwekkingscapaciteit voor hernieuwbare elektriciteit ramen we op basis van offshore windenergie (in GW), de ene keer voor het geval dat alle waterstof hernieuwbaar moet zijn, en de andere keer alleen voor de minimaal vereiste hernieuwbare waterstof.

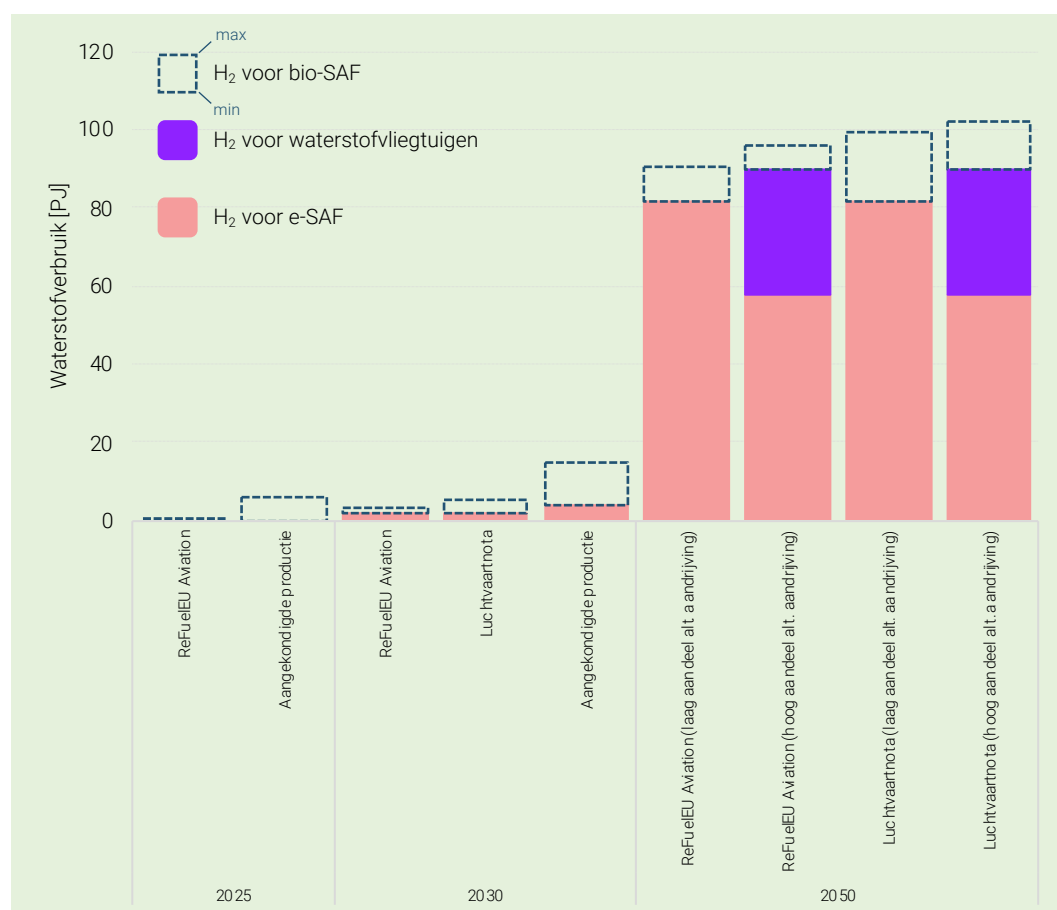
	2030			2050	
	ReFuelEU Aviation	Luchtvaartnota	Aangekondigde productie	ReFuelEU Aviation	Luchtvaartnota
Totale vraag naar SAF in Nederland [PJ]	8,9	25	81	78 – 110	123 – 175
Waarvan bio-SAF [PJ]	7,6	23,7	78,9	43 – 61	78 – 126
Waarvan e-SAF [PJ]	1,3	1,3	2,2	35 – 49	35 – 49
Vraag naar waterstof (fossiel en hernieuwbaar) [PJ]	3,2	5,4	14,5	91 – 96	100 – 102
Waarvan hernieuwbare waterstof [PJ]	2,1	2,1	3,7	82 – 90	82 – 90
Vraag naar additionele opwekkingscapaciteit voor hernieuwbare elektriciteit, als alle waterstof hernieuwbaar moet zijn [GW]	0,4	0,6	1,6	10,3 – 10,8	11,3 – 11,6
Waarvan een "ten minste" aandeel additionele opwekkingscapaciteit voor hernieuwbare elektriciteit [GW]	0,2	0,2	0,4	9,3 – 10,2	9,3 – 10,2

De aangekondigde SAF-productie in Nederland is in theorie voldoende om tot de periode van 2045-2049 aan ReFuelEU Aviation bio-SAF-mandaten te voldoen. Daarbij merken we op dat er voor de ReFuelEU Aviation mandaten voor e-SAF geen overeenkomstige e-SAF productie is

¹ In dit rapport gebruiken we de termen SAF, e-SAF en bio-SAF voor de duurzame, kerosine-achtige brandstoffen. Bij e-SAF betreft het SAF gemaakt op basis van hernieuwbare elektriciteit, bij bio-SAF betreft het een kerosinebrandstof op basis van biogene grondstoffen. De Europese Commissie gebruikt in het ReFuelEU Aviation voorstel de term 'synthetische brandstof' voor de brandstoffen die we in dit rapport als e-SAF omschrijven. Letterlijk gezien is een synthetische brandstof een brandstof die is verkregen via synthese uit syngas. De oorsprong van dit syngas is niet noodzakelijkerwijs hernieuwbaar. Om die reden houden we in dit rapport de termen SAF, e-SAF en bio-SAF aan als de hernieuwbare alternatieven voor fossiele kerosine. Waterstof, wanneer het rechtstreeks toegepast wordt in een waterstofvliegtuig, valt in dit rapport niet onder e-SAF.

gepland. In die situatie is vanaf 2035 import van e-SAF of additionele productie in Nederland nodig om aan de e-SAF mandaten te voldoen. De aangekondigde SAF-productiefaciliteiten in Nederland zullen naar verwachting ongeveer 14,5 PJ aan waterstof verbruiken, waarvan ongeveer 3,7 PJ hernieuwbaar moet zijn.

De hoeveelheid waterstof die in 2030 nodig is, vraagt om een extra opwekkingscapaciteit van hernieuwbare elektriciteit. Deze varieert tussen 0,2 en 1,6 GW, afhankelijk van het uitsluitend voldoen aan ReFuelEU Aviation of de Luchtvaartnota, en van de benodigde volumes voor de aangekondigde SAF-productie (en de uiteindelijke technologie die daarvoor wordt ingezet).



Figuur 1. Vergelijking van het waterstofverbruik van alle onderzochte scenario's van de ReFuelEU Aviation en de Luchtvaartnota en de aangekondigde productiecapaciteit. Bedenk wel dat deze hoeveelheden waterstof ook in het buitenland kunnen worden geproduceerd en als waterstof of als e-SAF kunnen worden geïmporteerd.

Tegen 2050 zal de waterstofvraag van de luchtvaart in Nederland sterk toenemen als gevolg van de hoge e-SAF-mandaten die in ReFuelEU Aviation zijn opgenomen. Dit betekent dat de waterstofvraag in de luchtvaartsector in 2050 tussen 82 en 102 PJ waterstof bedraagt². De grote marge is het gevolg van onzekerheden in (1) de exacte conversiepaden die worden gebruikt om de bio-SAF te produceren, (2) de mate van penetratie van waterstofvliegtuigen in de vloot in 2050, en (3) of de doelstelling van 63% SAF in ReFuelEU Aviation zal worden gehaald dan wel of de doelstelling van 100% SAF in de Luchtvaartnota. Voor deze volumes waterstof is een extra productiecapaciteit van 9,3 tot 11,6 GW aan hernieuwbare elektriciteitsopwekking nodig. Door het ondersteunen van waterstof-efficiënte bioconversiepaden (zoals bio-Fischer-Tropsch) kan Nederland tot 2 GW additionele opwekkingscapaciteit besparen.

² 82 en 102 PJ waterstof komt overeen met respectievelijk 683 en 850 duizend ton hernieuwbare waterstof. Ter vergelijking: volgens de studie "Waterstof - vraag en aanbod nu-2030" van Gasunie uit 2019 bedroeg het waterstofverbruik (op basis van aardgas) in de Nederlandse industrie 1,5 miljoen ton waterstof per jaar.

Inhoudsopgave

Managementsamenvatting	3
Afkortingen en vaktermen.....	6
Omrekeningsfactoren	6
1 Achtergrond	7
1.1 Vraag van onderzoek en methodologie	8
2 Technologische ontwikkelingen in vliegtuigaandrijving.....	10
2.1 Ontwikkelingen in waterstofvliegtuigen.....	11
2.2 Ontwikkelingen in batterij-elektrische vliegtuigen.....	11
3 Vraag naar duurzame luchtvaartbrandstoffen in Nederland.....	13
3.1 Mogelijke ontwikkelingen van de omvang van luchtvaart in Nederland	13
3.2 Vraag naar duurzame luchtvaartbrandstoffen op basis van ReFuelEU Aviation	15
3.3 Vraag naar duurzame luchtvaartbrandstoffen op basis van de Luchtvaartnota.....	16
3.4 Waterstofvraag van de luchtvaart.....	17
3.4.1 Waterstofvraag op basis van ReFuelEU Aviation.....	18
3.4.2 Waterstofvraag op basis van de Luchtvaartnota.....	21
4 Productie van duurzame luchtvaartbrandstoffen in Nederland.....	24
4.1 Projectie 2030: Aangekondigde SAF raffinaderijen in Nederland	24
4.2 Samenvatting van de waterstofvraag voor alle scenario's.....	27
5 Waterstofvraag ten opzichte van andere sectoren	31
6 Conclusies en aanbevelingen	33
6.1 Conclusies	33
6.2 Beleidsaanbevelingen	35
Bijlage 1 – Energievraag in de luchtvaartsector.....	37
Bijlage 2 – Berekeningen voor waterstofbehoefte bij bio-SAF	38

Afkortingen en vaktermen

De verschillende afkortingen, acroniemen en technische termen in dit rapport staan opgenomen in onderstaande tabel.

Tabel 2. Overzicht van afkortingen en technische termen

ASTM	American Society for Testing and Materials
ATAG	Air Transport Action Group
AtJ	Alcohol-to-Jet
Batterij-elektrisch	Elektrische aandrijflijn die energie haalt uit een accu die via een stekker moet worden opgeladen.
Brandstofcel	Elektrochemische generator, meestal via reactie van waterstof en zuurstof tot water en elektriciteit. In deze context gekoppeld aan een elektrische aandrijflijn voor de aandrijving.
CBS	Centraal Bureau voor de Statistiek
CCU	Carbon Capture and Utilisation
CO ₂	Koolstofdioxide
DACC	Direct Air Carbon Capture
e-kerosine / e-SAF	Hernieuwbare kerosine geproduceerd van hernieuwbare elektriciteit en CO ₂ , ook wel e-SAF genoemd
Elektrolyse	Elektrochemische productie van waterstof via elektriciteit en water. Momenteel in de belangstelling voor de productie van hernieuwbare waterstof uit hernieuwbare elektriciteit.
FT	Fischer-Tropsch: Syntheseprocess waarbij syngas (koolmonoxide en waterstof) wordt omgezet in hogere koolwaterstoffen zoals diesel, benzine, kerosine en nafta. Het syngas kan afkomstig zijn van de vergassing van biomassa (bio-Fischer-Tropsch) of van CO ₂ en elektriciteit (e-Fischer-Tropsch).
HEFA	Hydrotreated esters and fatty acids
Kerosine	Luchtvaartbrandstof voor straalmotoren
pkm	Passagierkilometer: het product van passagiers en reizigerskilometers
ReFuelEU Aviation	Voorstel van Europese Commissie voor een EU-verordening voor mandaten voor duurzame luchtvaartbrandstoffen
SAF	Sustainable Aviation Fuel (duurzame luchtvaartbrandstof). Door de Europese Commissie gedefinieerd als hernieuwbare drop-in vliegtuigbrandstof uit grondstoffen van bijlage IX A en bijlage IX B van de hernieuwbare energierichtlijn, of hernieuwbare brandstoffen van niet-biologische oorsprong (RFNBO). Brandstoffen op basis van voedsel en voedergewassen zijn uitgesloten.
Straalmotor	Jet engine: De meest gebruikte vliegtuigmotor van vandaag
TWh	Terawattuur
Waterstofvliegtuig	Vliegtuig dat op waterstof rijdt (in plaats van kerosine). In deze studie focussen wij ons op waterstofvliegtuigen met waterstofbrandstofcel.

Omrekeningsfactoren

In dit rapport drukken we de energie van luchtvaartbrandstoffen en waterstof uit in de eenheid petajoule (PJ). Hieronder geven we de omrekeningsfactoren naar ton en kubieke meters brandstof aan.

Brandstof	Petajoule (PJ)	Ton (t)	Kubieke meters (m ³)
Kerosine (bio-SAF en e-SAF)	1	22,7 duizend	28,1 duizend
Waterstof	1	8,3 duizend	117,4 duizend (voor vloeibare waterstof)

1 Achtergrond

Het energieverbruik van de Nederlandse luchtvaartsector heeft de afgelopen decennia een forse groei doorgemaakt. Sinds 1990 is de luchtvaartsector met 160% gegroeid en sinds 2010 bedroeg de groei 10%³. Mede door deze groei had de sector een aandeel van 15% van het totale energieverbruik van de Nederlandse transportsector in 2019⁴. Daarnaast heeft Nederland met een aandeel van ongeveer 50% in West-Europa een sleutelrol in de productie van en handel in kerosine⁵. Ondanks de grote energievraag van de Nederlandse luchtvaartsector, zijn er tot op heden geen verplichtingen voor het gebruik van hernieuwbare luchtvaartbrandstoffen^{6,7}. Dit betekent dat nagenoeg alle geproduceerde en gebruikte luchtvaartbrandstof fossiele kerosine is. De Nederlandse luchtvaartsector heeft daardoor een significant aandeel in de uitstoot van broeikasgassen. Vanwege het internationale karakter van luchtvaart wegen deze niet mee voor de aan Nederland toe te rekenen klimaatmissies. Toch is er een noodzaak om de klimaatmissies van de Nederlandse luchtvaartsector terug te dringen. Op EU-schaal bedraagt het energieverbruik van luchtvaart ca. 15% van het totale energieverbruik in de mobiliteitssector⁸, en het is de verwachting dat dit in de toekomst verder zal groeien.

Het beleid voor de inzet van vliegtuigbrandstoffen zal echter veranderen: In juli 2021 presenteerde de Europese Commissie een voorstel voor een verordening (ReFuelEU Aviation) die mandaten stelt voor de minimum bijmenging van hernieuwbare luchtvaartbrandstoffen in de luchtvaartsector. Deze verordening schrijft voor dat per 2025 een toenemende inzet van duurzame luchtvaartbrandstoffen (kortweg SAF: sustainable aviation fuels) ter vervanging van kerosine verplicht is. De bijmengpercentages, waarvan een deel hernieuwbare brandstof van niet-biologische oorsprong (hierna e-SAF), nemen jaarlijks toe, beginnend in 2025, tot 2050. Vanaf 2025 geldt een verplicht aandeel van 2% SAF. In 2030 moet ten minste 5% van alle geleverde kerosine SAF zijn, waarvan ten minste 0,7% e-SAF. In 2050 moet ten minste 63% van alle geleverde kerosine SAF zijn, waarvan ten minste 28% e-SAF. Een kanttekening hierbij is dat het voorstel van de Europese Commissie op het moment ter bespreking tussen het Europese Parlement en de Europese Raad voorligt (de Trialoofase). Dit zou mogelijk tot veranderingen in de bovengenoemde getallen kunnen leiden.

Daarnaast heeft de Nederlandse luchtvaartsector tijdens de discussies over het Nederlandse Klimaatakkoord al hogere nationale ambities geformuleerd in de in 2020 gepubliceerde Luchtvaartnota: 14% SAF in 2030 en 100% SAF in 2050. De Luchtvaartnota maakt niet expliciet melding van ambities voor het gebruik van e-SAF.

Ook buiten Europa stellen landen doelen in voor de inzet van duurzame luchtvaartbrandstoffen. Zo hebben de Verenigde Staten onlangs onder het kabinet-Biden ambities voor het gebruik van SAF bijgesteld naar ca 9 miljoen ton in 2030⁹. Dit komt ongeveer overeen met een ambitie van 9% aandeel SAF in 2030¹⁰.

Als gevolg van deze ontwikkelingen zien we (wereldwijd) veel aankondigingen voor de bouw van nieuwe productie-installaties voor geavanceerde biobrandstoffen of e-brandstoffen voor de luchtvaartsector. In dit rapport definiëren we hernieuwbare luchtvaartbiobrandstoffen als bio-SAF en hernieuwbare e-brandstoffen voor de luchtvaart als e-SAF.

Voor de raffinage van bio-SAF is, net als bij de raffinage van conventionele brandstoffen, waterstof nodig. Momenteel is fossiel aardgas de bron voor deze waterstof, maar zal in toenemende mate elektrolyse, aangedreven door hernieuwbare elektriciteit, de

³ CBS – Motorbrandstoffen; afzet in petajoule, volume en gewicht, 1946-april 2021

⁴ CBS – Motorbrandstoffen; afzet in petajoule, volume en gewicht, 1946-april 2021

⁵ Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2020, Verantwoord vliegen naar 2050. Luchtvaartnota 2020-2050

⁶ Hernieuwbare brandstoffen stoten CO₂ uit die of planten via fotosynthese of via DACC of CCU uit de atmosfeer worden opgenomen. Hierdoor hebben hernieuwbare brandstoffen op netto-basis geen CO₂ bijdrage.

⁷ IATA, 2022, Global Outlook for Air Transport Times of Turbulence, June 2022

⁸ Zie de datasets over de Energy Balances van EU-lidstaten en EU27 van Eurostat
<https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/database>

⁹ The White House, 2021, Fact Sheet: Biden Administration Advances the Future of Sustainable Fuels in American Aviation. Website geraadpleegd op 11 november 2022.

¹⁰ Berekend op basis van een totale kerosineconsumptie van 1,4 miljoen barrels per dag (bron: Energy Information Agency, EIA)

productiemethode voor waterstof zijn. De productie van e-SAF vereist meer waterstof dan bio-SAF. In het geval van e-SAF moet de waterstof van hernieuwbare origine zijn om als hernieuwbare brandstof te tellen. Verder vereist de productie van e-SAF CO₂. Deze kan bijvoorbeeld opgevangen worden van industriële emissies (carbon capture and use, CCU) of direct uit de atmosfeer via DAC (direct air carbon capture). Nieuw voorgestelde Europese regelgeving¹¹ schrijft voor dat fossiele emissies van de industrie (CCU) tot 2035 gebruikt mogen worden voor de productie van e-SAF. Na 2035 moet de CO₂ afkomstig zijn van biogene emissies (vrijkomend bijvoorbeeld bij biobrandstofproductie) of van DAC.

De inzet van duurzame vliegtuigbrandstoffen in vliegtuigen leidt op een well-to-wing¹² basis nagenoeg niet tot toevoeging van extra broeikasgassen in de atmosfeer. Er kunnen bij de verbranding wel andere emissies ontstaan, zoals ook bij fossiele kerosine het geval is, bijvoorbeeld koolmonoxide (CO), stikstofoxiden (NO_x), aerosolen en fijnstof (pm: particulate matter). Deze emissies hebben ook invloed op luchtkwaliteit, het milieu, de opwarming van de aarde en de menselijke gezondheid. Daarom vindt momenteel ook veel onderzoek plaats naar waterstofvliegtuigen met brandstofcel. Dit kan op termijn de vraag naar hernieuwbare waterstof nog verder stimuleren. Het is echter nog onduidelijk wat de klimaateffecten zijn van de uitstoot van waterdamp uit waterstofvliegtuigen.

1.1 Vraag van onderzoek en methodologie

Onderzoeksvraag

Dit onderzoek in opdracht van de Directie Luchtvaart van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat heeft tot doel de volgende vragen te beantwoorden:

- Hoeveel (hernieuwbare en/of grijze) waterstof heeft de Nederlandse luchtvaartsector naar verwachting nodig richting 2030 en 2050 om te voldoen aan de Europese ReFuelEU Aviation verordening en de nationale doelstellingen uit de Luchtvaartnota?
- Hoeveel (hernieuwbare en/of grijze) waterstof zal worden gebruikt voor direct verbruik in waterstofvliegtuigen en hoeveel zal nodig zijn voor raffinage van SAF?
- Hoeveel hernieuwbare elektriciteit en elektrolysecapaciteit is nodig om aan deze vraag naar hernieuwbare waterstof te voldoen?
- Hoe verhoudt de waterstofvraag van de luchtvaart zich tot andere (economische) sectoren?

Methodologie

Om bovenstaande vragen te beantwoorden, schatten we eerst de toekomstige energievraag van de Nederlandse luchtvaartsector. In deze schatting houden we rekening met technologische ontwikkelingen van vliegtuigen, waarbij we vooral kijken naar alternatieve aandrijving. De mate van technologische ontwikkelingen beïnvloedt de vraag naar energie en daarmee ook de vraag naar waterstof; voor de productie van SAF dan wel voor direct gebruik in waterstofvliegtuigen.

Op basis van deze schatting berekenen we hoeveel bio-SAF en e-SAF nodig is om te voldoen aan de Europese ReFuelEU Aviation verordening en de nationale Luchtvaartnota doelstellingen voor de periode tussen 2025 en 2050. Vervolgens schatten we hoeveel waterstof hiervoor nodig is. De totale waterstofvraag is een optelsom van twee componenten: de benodigde hoeveelheid waterstof voor het raffineren van bio-SAF en e-SAF, en de benodigde hoeveelheid waterstof voor direct gebruik door vliegtuigen met een waterstofbrandstofcel (in dit rapport hanteren we voornamelijk de term 'waterstofvliegtuig').

¹¹ Europese Commissie – Draft Commission Delegated Regulation supplementing Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council by establishing a minimum threshold for greenhouse gas emissions savings of recycled carbon fuels and by specifying a methodology for assessing greenhouse gas emissions savings from renewable liquid and gaseous transport fuels of non-biological origin and from recycled carbon fuels

¹² De 'well-to-wing' basis houdt in dat de klimaatprestatie van SAF ten opzichte van fossiele kerosine vergeleken wordt over de gehele keten van productie en verbranding van de brandstoffen, dus een optelling van de klimaatimpact van well-to-tank en tank-to-wing. In deze vergelijking worden de emissies van SAF in het tank-to-wing gedeelte volgens IPCC methode niet meegenomen. Deze methode geeft de vermeden emissies weer die zouden optreden bij gebruik van fossiele brandstof.

Ook berekenen we hoe groot het aandeel van hernieuwbare waterstof is en hoeveel hernieuwbare elektriciteit en opwekkingscapaciteit nodig is om aan deze vraag te voldoen.

Hierna onderzoeken we hoeveel luchtvaartbrandstoffen in Nederland op jaarbasis worden geproduceerd en hoe dit zich verhoudt ten opzichte van de vraag naar luchtvaartbrandstoffen in Nederland. We kijken naar productiecapaciteit van aangekondigde SAF-productiefaciliteiten en op basis van deze bevindingen berekenen we hoeveel waterstof er nodig is voor luchtvaartbrandstof in deze installaties. Ook hier berekenen we het aandeel hernieuwbare waterstof en elektriciteit.

Tot slot onderzoeken we hoe de vraag naar waterstof in de luchtvaartsector zich verhoudt tot andere sectoren.

We stellen aan het eind van dit rapport conclusies op op basis van de resultaten van dit onderzoek en doen enkele aanbevelingen aan beleidsmakers en besluitvormers.

2 Technologische ontwikkelingen in vliegtuigaandrijving

Op dit moment zijn straalmotoraangedreven vliegtuigen dominant in de luchtvaartsector en daarmee ook de grootste energieverbruikers in de luchtvaart. Deze vliegtuigen zijn gedurende vele decennia geoptimaliseerd en hebben tegenwoordig specifieke kenmerken, zoals een smalle romp en een brandstofsysteem dat zich in de vleugels bevindt. Deze ontwikkelingen hebben geresulteerd in steeds efficiëntere vliegtuigen die aldus met minder energie per vlucht toekunnen. De toekomstige energievraag van de luchtvaart zal ook beïnvloed worden door de mate van technologische ontwikkeling. Vliegtuigen zullen nog efficiënter worden als gevolg van nieuwe ontwerpen voor verbeterde aerodynamica, maar ook als gevolg van het op de markt komen van alternatieve aandrijvingen en energiedragers, zoals batterij-elektrische vliegtuigen en waterstofvliegtuigen.

Voor de berekening van de totale energievraag houden we rekening met de ontwikkeling van energiezuinigere vliegtuigen. Hiervoor gebruiken we de waarden (pkm) van het E3-Modelling PRIMES-TREMOVE-model¹³. We houden rekening met de efficiëntiewinsten als gevolg van nieuwe ontwerpen voor verbeterde aerodynamica van de huidige straalmotorvliegtuigen en als gevolg van de introductie van batterij-elektrische vliegtuigen en waterstofvliegtuigen. In het model is overigens ook meegenomen dat het volume aan passagierskilometers naar verwachting zal toenemen.

Vliegtuigfabrikanten ontwerpen efficiëntere vliegtuigen die minder luchtweerstand ondervinden, waardoor het brandstofverbruik afneemt. Op basis van het E3-Modelling PRIMES-TREMOVE-model gaan we uit van een efficiëntiewinst van 10% over de hele vloot (inclusief oudere vliegtuigen), van 1,043 megajoule per passagierskilometer (MJ/pkm) in 2015 tot 0,939 MJ/pkm in 2050.

Alternatieve aandrijving, zoals batterij-elektrische vliegtuigen en waterstof-elektrische vliegtuigen kan tot verdere efficiëntiewinsten leiden, maar zijn nog in ontwikkeling en zullen daarom veel langzamer in de vloot worden geïntroduceerd.

Waterstofvliegtuigen zijn volgens het E3 PRIMES-TREMOVE model efficiënter dan straalmotorvliegtuigen en kunnen daardoor de totale vraag naar energie reduceren (bij gelijkblijvende passagierskilometers). Maar tegelijkertijd zou de introductie van waterstofvliegtuigen de vraag naar waterstof doen stijgen. Op basis van het E3-Modelling PRIMES-TREMOVE-model gaan we uit van een efficiëntiewinst van 6%, van 0,684 MJ/pkm voor waterstofvliegtuigen in 2030 en 0,643 MJ/pkm in 2050.

Batterij-elektrische vliegtuigen zijn ook efficiënter dan kerosineaangedreven vliegtuigen en kunnen daardoor het energieverbruik verlagen. Op basis van het E3-Modelling PRIMES-TREMOVE-model gaan we uit van een constante efficiëntie van 0,599 MJ/pkm voor batterij-elektrische vliegtuigen van 2030-2050.

Een kanttekening hierbij is dat we van experts van de TU Delft hebben vernomen dat het E3 Modelling PRIMES TREMOVE model de efficiëntiewinst van straalmotoren mogelijk onderschat. Op basis van historische waarden zou de efficiëntiewinst ook tot 56% kunnen oplopen.¹⁴ Een andere studie van Air Travel Aviation Group (ATAG) gaat uit van efficiëntiewinst van 20% per vliegtuiggeneratie. Volgens een professor van de TU Delft¹⁴ wordt de energie-efficiëntiewinst van brandstofcel- en batterij-elektrische vliegtuigen in de literatuur daarentegen vaak overschat, doordat in de meeste studies de energieoutput per energieinput alleen op basis van alleen de aandrijving meet (zoals een enkele brandstofcel vergeleken met een enkele straalmotor). Een verandering van aandrijving leidt echter ook tot grootschalige veranderingen aan het vliegtuigontwerp en dat kan zowel negatieve als positieve impacts hebben op de energievraag en de thermodynamiek.

¹³ E3 Modelling – PRIMES TREMOVE model voor 2020 EU Reference Scenarios (gepubliceerd 2021).

¹⁴ Persoonlijke communicatie met professoren van TU Delft Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek over nog te publiceren werk.

Toch houden we de efficiëntiewaardes zoals vermeld in de E3Modelling PRIMES TREMOVE aan om consistent te zijn met de Europese modellering en wetgeving, alsook met de resultaten van PBL's Klimaat- en Energieverkenning van 2022 (zoals te zien in hoofdstuk 3).

Tabel 3. Efficiëntie van vliegtuigen (in de vloot) met de onderzochte aandrijving voor de luchtvaart.¹⁵

	Eenheid	2020	2030	2050
Straalmotor	[MJ/pkm]	1,043	0,998	0,939
Brandstofcel	[MJ/pkm]	–	0,684	0,643
Batterij-elektrisch	[MJ/pkm]	–	0,599	0,599

2.1 Ontwikkelingen in waterstofvliegtuigen

Tegenwoordig vindt veel onderzoek plaats naar het gebruik van waterstof in waterstofvliegtuigen, omdat ze geen CO₂-, NO_x- en fijnstofemissies hebben. In de brandstofcel van deze vliegtuigen reageert waterstof met zuurstof uit de lucht. Hierdoor ontstaat er elektriciteit en water. Het vliegtuig gebruikt elektriciteit voor de voortstuwing.

Het voordeel van waterstofvliegtuigen ten opzichte van batterij-elektrische vliegtuigen is dat waterstof meer energie per gewicht of volume bevat dan batterijen. Dit betekent dat waterstofvliegtuigen groter kunnen zijn, met een groter bereik. De brandstofcel vervangt het verbrandingsproces en dat leidt tot het vermijden van overige, niet-CO₂-emissies. Er zijn echter nog technische uitdagingen, zoals de koeling en het gewicht van de brandstofcel en de lage energiedichtheid van waterstof vergeleken met kerosine.

Vliegtuigen die waterstof gebruiken bestaan al sinds 1988¹⁶. De eerste waterstofvliegtuigen waren echter uitgerust met een verbrandingsmotor. In deze studie focussen wij ons echter op waterstofvliegtuigen met brandstofcellen (en noemen deze verder 'waterstofvliegtuigen' voor de eenvoud). Brandstofcellen zijn een relatief nieuwe ontwikkeling, met eerste demonstratievluchten vanaf 2007¹⁷. In de afgelopen 4-5 jaar heeft het concept van waterstof-elektrische vliegtuigen aan kracht gewonnen. Demonstratieprojecten omvatten (maar zijn niet beperkt tot):

- het Amerikaanse en Britse bedrijf ZeroAvia,
- FlyZero van het Aerospace Technology Institute,
- AeroDelft van de TU Delft,
- MAHEPA Hy4 (Horizon 2020),
- Smartfish van het German Aerospace Center (DLR), en
- Project Fresson van Cranfield University.

Deze vliegtuigen bevinden zich nog in de vroege pilot- en demonstratiefase. Waterstof-elektrische demonstratievliegtuigen kunnen nog steeds slechts 9 passagiers over korte afstanden vervoeren en zijn niet commercieel verkrijgbaar. Waterstof-retrofittingbedrijf ZeroAvia verwacht echter dat de vooruitgang in waterstof-elektrische vliegtuigen snel zal gaan. Zij verwachten namelijk dat er in 2030 al waterstofvliegtuigen met 100-200 passagiers en 2000 nautische mijlen (NM) (3700 km) bereik zullen bestaan. In 2040 zullen deze waarden volgens ZeroAvia opschalen naar 200+ passagiers en 5000 NM (9300 km) bereik. Kanttekening hierbij is dat ZeroAvia optimistische waarden voor hun innovatieprogramma geeft, maar de commerciële inzet van deze vliegtuigen is naar verwachting ten minste enkele jaren later.

2.2 Ontwikkelingen in batterij-elektrische vliegtuigen

Er vindt ook onderzoek plaats naar batterij-elektrische vliegtuigen. Het potentiële voordeel van deze vliegtuigen zou een hogere efficiëntie zijn: het opladen van een vliegtuig met hernieuwbare elektriciteit is efficiënter dan het eerst omzetten van hernieuwbare elektriciteit

¹⁵ Europese Commissie, 2021, EU Reference Scenario 2020.

¹⁶ Zie de Tupolev Tu-155 voor verdere referentie.

¹⁷ Zoals de DLR Hyfish.

in waterstof en het vervolgens weer omzetten in elektriciteit via de brandstofcel van een vliegtuig. Net als waterstofvliegtuigen hebben batterij-elektrische vliegtuigen nog technische uitdagingen, zoals de lage energiedichtheid en het hoge gewicht van batterijen, die hun toepassing bij langeafstandsvluchten met veel passagiers belemmert.

De eerste bemande vlucht van een volwaardig batterij-elektrisch vliegtuig was in 1973, met een Militky MB-E1, een gemodificeerd Brditschka HB-3 motorzweefvliegtuig. Sindsdien zijn er vele demonstraties van elektrische vliegtuigen uitgevoerd. Hoewel de meeste beschikbare ontwerpen vooral gericht zijn op het hobbyvliegen (met vliegtuigen die maximaal 4 personen kunnen vervoeren), zijn er recentelijk vorderingen gemaakt met het verhogen van het aantal passagiers. De Cessna 208B eCaravan bijvoorbeeld is een elektrisch vliegtuig voor 9 passagiers dat met 4-5 passagiers 30 minuten kan vliegen (plus 30 minuten reserve).

Eviation Alice is een ander vermeldenswaardig batterij-elektrisch vliegtuig, ontworpen om 9 passagiers te vervoeren. Het heeft zijn eerste testvlucht in september 2022 voltooid en zal naar verwachting in 2027 in gebruik worden genomen, met een maximaal bereik van ongeveer 460 km. De Zweedse startup Heart Aerospace hoopt in 2026 een eerste testvlucht van de ES-30 uit te voeren, met tot 30 passagiers en een bereik tot 800 km.

3 Vraag naar duurzame luchtvaartbrandstoffen in Nederland

3.1 Mogelijke ontwikkelingen van de omvang van luchtvaart in Nederland

Op basis van het beperkte elektrificatiepotentieel wordt de luchtvaartsector over het algemeen beschouwd als een 'hard-to-abate' transportsector. Er bestaat consensus tussen de luchtvaartindustrie, academici en beleidsmakers dat SAF de primaire optie voor broeikasgasreductie op de korte en middellange termijn zal zijn^{18,19,20,21}. Tabel 4 toont de grote rol die SAF zal spelen voor de meeste CO₂-uitstotende vluchten van 2020 tot 2050. Het is duidelijk dat SAF een sleutelrol zal spelen in met name longhaul- en mediumhaul-vluchten, die samen ongeveer 73% van de CO₂-uitstoot van de luchtvaartindustrie vertegenwoordigen. Voor kortere vluchten is inzet van waterstof of batterij-elektrische vliegtuigen ook te verwachten.

Tabel 4. De rol van SAF, waterstof- en batterij-elektrische vliegtuigen per type commerciële vlucht van 2020 tot 2050. Aangepast op basis van ATAG Waypoint 2050 rapport.^{18, 8)}

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Forens en regionaal (<4%) ⁹⁾	SAF	(Electric, H ₂) SAF	Electric, H ₂ SAF	Electric, H ₂ SAF	Electric, H ₂ SAF	Electric, H ₂ SAF	Electric, H ₂ SAF
Short haul 100-150 zitplaatsen 45-120 minuten vluchten ~24% van CO₂-uitstoot sector	SAF	SAF	SAF	SAF mogelijk wat waterstof	waterstof en/of SAF	waterstof en/of SAF	waterstof en/of SAF
Medium haul 100-250 zitplaatsen 60-150 minuten vluchten ~43% van CO₂-uitstoot sector	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF mogelijk wat waterstof	SAF mogelijk wat waterstof	SAF mogelijk wat waterstof
Long haul 250+ zitplaatsen 150+ minuten vluchten ~30% van CO₂-uitstoot sector	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF

⁸⁾ Per tabelrij beschrijven we de verschillende vluchttypen. De hoogte van elke rij in de tabel geeft in verhouding de corresponderende CO₂ uitstoot van deze sector weer. Daarmee visualiseert dit de mogelijke bijdrage van de verschillende duurzame luchtvaartbrandstoffen.

⁹⁾ "Forens en Regionaal" betreft vluchten van <90 minuten en 9-100 zitplaatsen, en vertegenwoordigen minder dan 4% van de CO₂ uitstoot van de luchtvaartsector. Waterstof is in deze tabelrij aangegeven als H₂

¹⁸ ATAG (2021) – Waypoint 2050. Second edition.

¹⁹ Europese Commissie (2021) – Staff Working Document SWD6/33/final accompanying the Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on ensuring a level playing field for sustainable air transport

²⁰ Johnson Matthey Technology Review (2020) – Sustainable Aviation Fuels. Status, challenges and prospects of drop-in liquid fuels, hydrogen, and electrification in aviation.

²¹ Electrive (2021) – Hydrogen fuel cell aircraft – what for and when?

Op dit moment hebben verschillende SAF-opties goedkeuring gekregen van het Amerikaanse standaardisatie-instituut ASTM, dat het leidende orgaan is voor goedkeuring van vliegtuigbrandstoffen. Dit houdt in dat bijmenging van SAF bij standaardkerosine tot een bepaald percentage toegestaan is voor toepassing in commerciële vluchten. De goedgekeurde SAF-types zijn vermeld in Tabel 5 hieronder. Voor deze studie richten we ons op de belangrijkste SAF-types die tot 50% kunnen worden bijgemengd:

- Hydrotreated esters and fatty acids (hierna HEFA)
- Fischer-Tropsch synthetic paraffinic kerosene (hierna FT e-kerosine of FT biokerosine, afhankelijk van de feedstock)
- Alcohol-to-Jet (hierna AtJ)²²

Tabel 5. ASTM D7566 en ASTM D1655-goedgekeurde SAF types voor gebruik in commerciële vluchten²³.

ASTM-goedgekeurde SAF types	Afkorting	Jaar van goedkeuring	Maximaal bijmengniveau
Fischer-Tropsch synthetic paraffinic kerosene	FT-SPK	2009	50%
Synthetic paraffinic kerosene from hydroprocessed esters and fatty acids	HEFA-SPK	2011	50%
Synthesised isoparaffins from hydroprocessed fermented sugars	HFS-SIP	2014	10%
FT-SPK with added synthesised aromatics from the alkylation of non-petroleum derived light aromatics	SPK/A	2015	50%
Alcohol-to-Jet: Isobutanol to aviation fuel	AtJ-SPK	2016	50%
Alcohol-to-Jet: Ethanol to aviation fuel	AtJ-SPK	2018	50%
Catalytic hydrothermolysis synthesised kerosene	CHJ-SK	2020	50%
Hydrocarbon-HEFA using microalgae-based jet fuel	HHC-SPK	2020	10%
Co-processing – biocrude used in petroleum refinery processes	–	2020	5%

Tot 2050 zullen de door ASTM maximale bijmengniveaus (van 50%) afdoende zijn om aan de mandaten van ReFuelEU en aan de ambities van de Luchtvaartnota te voldoen. Vanaf 2050 moeten het aandeel hoger liggen om te kunnen voldoen aan de ReFuelEU-mandaten (63%) en om aan de ambities van de Luchtvaartnota (100%). Tegen die tijd zullen de standaarden hierop aangepast moeten zijn.

De hoeveelheid SAF die in Nederland geleverd moet gaan worden aan de luchtvaartsector is afhankelijk van de totale Nederlandse vraag. Dit is omdat de ambitie van de Luchtvaartnota en de mandaten van ReFuelEU Aviation gedefinieerd zijn als een percentage van het totaal aan geleverde kerosine. De inzet van de, in hoofdstuk 2 benoemde, alternatieve aandrijving op basis van direct waterstofgebruik heeft invloed op het totale kerosineverbruik. Een hoge invoeringsgraad van deze technologieën in aanloop naar 2050 zou de totale vraag naar luchtvaartbrandstoffen en daarmee de vraag naar SAF verminderen. Bovendien zijn deze nieuwe technologieën ook energiezuiniger. Dit betekent dat de totale energievraag van de luchtvaart af zou kunnen nemen wanneer batterij-elektrische- en waterstofvliegtuigen de markt betreden.

Om het aandeel batterij-elektrische en waterstofvliegtuigen mee te nemen in de berekening van de totale energievraag in Nederland maken we gebruik van resultaten uit de tweede, meest recente editie van het Waypoint 2050 (ATAG)¹⁸ rapport. Dit rapport geeft een inschatting van de samenstelling van de toekomstige vloot vanuit de perspectief van de luchtvaartmaatschappijen. Uit dit onderzoek is gebleken dat in het scenario met de hoogste innovatiegraad 20% van de totale energievraag in de luchtvaart van waterstofvliegtuigen afkomstig is. In hetzelfde scenario hebben batterij-elektrische vliegtuigen een aandeel van 2%

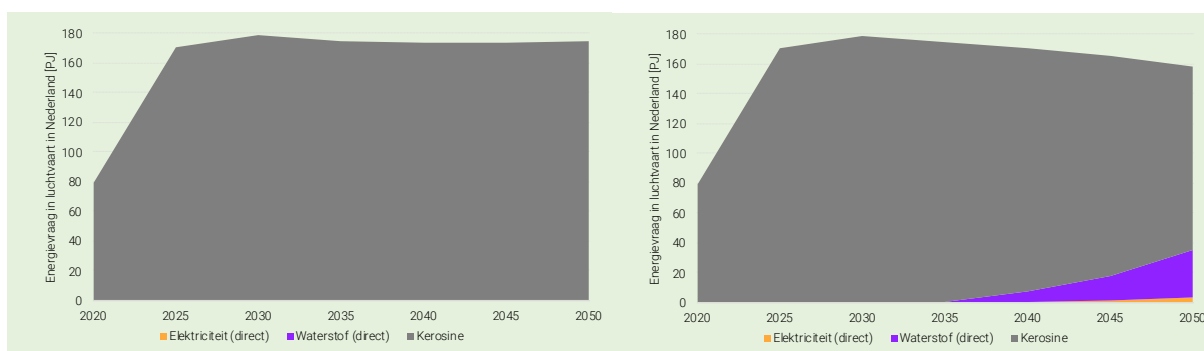
²² Catalytic hydrothermolysis synthesised kerosene werd verondersteld gelijkwaardig te zijn aan HEFA omdat beide producten dezelfde grondstofbasis delen (plantaardige oliën en gebruikte frituurvet)

²³ ICAO (2022) – Conversion processes. Website geraadpleegd op 2 november 2022.

in de totale energievraag. Dit zal dan ook leiden tot meer inzet van waterstofvliegtuigen in het short-haul- en medium-haul-segment.

In dit rapport schatten we de vraag naar de totale energievraag tussen 2025 en 2050 op basis van twee technologische scenario's: (1) een met een laag aandeel alternatieve aandrijving en (2) een met een hoog aandeel alternatieve aandrijving. In het scenario met een laag aandeel gaan we uit van alleen op fossiele kerosine aangedreven straalvliegtuigen tot tenminste 2050. In het scenario met een hoog aandeel alternatieve aandrijving gaan we uit van het Waypoint 2050 onderzoek: 20% waterstof-, 2% batterij-elektrisch en 78% fossiele straalmotoraandrijving.

Op basis van de vlootontwikkelingen van Waypoint 2050 (ATAG), de efficiëntieontwikkelingen en de luchtvaartprognoses van het EU Reference Scenario 2020²⁴ hebben we de energievraag van de Nederlandse luchtvaartsector geschat voor de periode 2020-2050 (zie Figuur 2).



Figuur 2. Energiemix in de nationale en internationale luchtvaart in Nederland in het scenario met een laag aandeel alternatieve aandrijving (links) en het scenario met een hoog aandeel alternatieve aandrijving (rechts).

Uit Figuur 2 valt op te maken dat batterij-elektrische en waterstofsysteem de totale luchtvaartvraag in 2050 na een piek rond 2030 verminderen tot 175 PJ in het scenario met laag aandeel en tot 158 PJ in het scenario met hoog aandeel alternatieve aandrijving. In het scenario met een hoog aandeel alternatieve aandrijving hebben luchtvaartbrandstoffen een bijdrage van 123 PJ en alternatieve aandrijving een bijdrage 35 PJ. De resultaten zijn ook terug te vinden in Tabel 13 en Tabel 14 in de Bijlage.

3.2 Vraag naar duurzame luchtvaartbrandstoffen op basis van ReFuelEU Aviation

In juli 2021 publiceerde de Europese Commissie haar voorstel voor een verordening om te zorgen voor een gelijk speelveld voor duurzaam luchtvervoer (ReFuelEU Aviation). Deze verordening is gepubliceerd als onderdeel van de Green New Deal (Fit-for-55). Het voorstel van de Commissie is nog in behandeling bij het Europees Parlement en de Europese Raad. De Commissie, het Parlement en de Raad gaan nog een dialoog houden om een besluit te nemen over de definitieve, juridisch bindende versie van ReFuelEU Aviation. Dit betekent dat de in dit rapport gehanteerde bijmengpercentages nog niet definitief zijn. Het voorstel van de Commissie is de meest actuele informatie op het moment van schrijven van dit verslag. Daarom gebruiken we de mandaten die in het voorstel van de Commissie staan voor onze berekeningen.

ReFuelEU Aviation verplicht minimale volumenaandelen van SAF, die elke 5 jaar stapsgewijs omhoog gaan voor de periode tussen 2025 en 2050²⁵. Daarnaast is er een submandaat voor minimale volumeaandelen van synthetische vliegtuigbrandstoffen, die de Europese Commissie verstaat als hernieuwbare brandstoffen van niet-biologische oorsprong (RFNBO,

²⁴ Europese Commissie (2021) – EU Reference Scenario 2020.

²⁵ Met vooral een grote opschalingsstap in 2035, met een verplichting van 20%, ten opzichte van 5% voor de periode 2030-2034.

van het Engels: renewable fuels of non-biological origin)²⁶. In dit rapport gebruiken we de term e-SAF om synthetische vliegtuigbrandstoffen aan te duiden.

De mandaten die staan vermeld in Bijlage I van het voorstel voor de ReFuelEU Aviation verordening zijn samengevat in Tabel 6 hieronder.

Tabel 6. Mandaten onder de ReFuelEU Aviation verordening voor totale SAF-doel, en daarin e-SAF minimum volumes²⁷.

	Eenheid	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Totale SAF-doel	[vol.-%]	2%	5%	20%	32%	38%	63%
e-SAF-doel (binnen totale doel)	[vol.-%]	–	0,7%	5%	8%	11%	28%

Door deze informatie te combineren met de vraag naar luchtvaartbrandstoffen die we in paragraaf 3.1 hebben berekend, leiden we de SAF-vraag voor de scenario's met laag en hoog aandeel alternatieve aandrijving af:

Tabel 7. Totale SAF-doel en het e-SAF subdoel onder de ReFuelEU Aviation verordening in PJ²⁸, vertaald naar de Nederlandse context voor twee verschillende technologie-ontwikkelingsscenario's.

Scenario	SAF-doel	Eenheid	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Laag aandeel alternatieve aandrijving	Totaal	[PJ]	3,4	8,9	34,9	55,7	66,1	110,2
	waarvan e-SAF	[PJ]	0,0	1,3	8,7	13,9	19,1	49,0
Hoog aandeel alternatieve aandrijving	Totaal	[PJ]	3,4	8,9	34,9	52,0	56,4	77,8
	waarvan e-SAF	[PJ]	0,0	1,3	8,7	13,0	16,3	34,6

Voor de periode tussen 2025 en 2035 is de vraag naar SAF voor beide scenario's hetzelfde. Vanaf 2035 zal de totale energievraag dalen en daarmee ook de vraag naar SAF, vanwege de introductie van alternatieve aandrijflijnen (zie Figuur 2).

3.3 Vraag naar duurzame luchtvaartbrandstoffen op basis van de Luchtvaartnota

Het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat heeft in november 2020 de Luchtvaartnota gepubliceerd, ruim een half jaar vóór de publicatie van ReFuelEU Aviation door de Europese Commissie. De publicatie liep synchroon met een sectorinitiatief voor verduurzaming van de luchtvaart. De Luchtvaartnota beschrijft een strategie voor verantwoord vliegen in Nederland tot 2050 en omvat aspecten voor klimaatactie, maar gaat ook in op vermindering van lawaai en terugdringen van de uitstoot van verontreinigende stoffen.

Wat de klimaatdoelstellingen betreft, streeft de Luchtvaartnota naar een SAF-aandeel van 14 % van alle vliegtuigbrandstoffen in 2030 en 100 % in 2050. In vergelijking met ReFuelEU Aviation is er een aanzienlijk hoger ambitieniveau, maar er zijn geen subdoelstellingen voor e-SAF. Verder is het van belang te beseffen dat de Luchtvaartnota een ambitie uitspreekt maar geen harde bijmengverplichting voorschrijft, terwijl dat bij de implementatie van ReFuelEU Aviation wel het geval zal zijn. Uitgaande van deze mandaten en de twee innovatie scenario's zijn de totale vereiste SAF-volumes als vermeld in Tabel 8.

²⁶ Letterlijk gezien is een synthetische brandstof een brandstof die is verkregen via synthese uit syngas. De oorsprong van dit syngas valt niet onder de definitie "synthetisch". Het kan worden gemaakt van biomassa, van CO₂ en elektriciteit of zelfs van fossiele oorsprong. De Europese Commissie gebruikt echter deze vakterm als hernieuwbare drop-in kerosine van niet-biologisch oorsprong. We raden aan om dit soort brandstoffen in plaats daarvan jet e-fuels, e-kerosine of RFNBO's te noemen.

²⁷ Europese Commissie, 2021, ReFuelEU Aviation verordening.

²⁸ We gebruiken in dit rapport overal petajoules als energie-eenheid. Voor de omrekening naar tonnen of kubieke meters verwijzen wij naar de tabel op pagina 6.

Tabel 8. SAF-volumes onder de ambities van de Luchtvaartnota voor elke technologiescenario.

	Eenheid	2030	2050
Totale SAF-doel	[vol.-%]	14%	100%
Vraag naar SAF met lage innovatiegraad	[PJ]	25,0	174,9
Vraag naar SAF met hoge innovatiegraad	[PJ]	25,0	122,4

3.4 Waterstofvraag van de luchtvaart

Elke type SAF heeft een specifieke hoeveelheid waterstof nodig voor de productie. Tabel 9 hieronder toont de hoeveelheid waterstof die nodig voor de productie van SAF die we in dit rapport meenemen in de analyse. Het waterstofverbruik is op basis van massa en energie weergegeven,

Uit Tabel 9 is duidelijk dat Fischer-Tropsch e-kerosine de meeste hoeveelheid waterstof nodig heeft. Fischer-Tropsch e-kerosine combineert CO₂ met hernieuwbare waterstof. Alle energie van deze e-kerosine is afkomstig van de hernieuwbare waterstof (en van de hernieuwbare elektriciteit waar de waterstof mee is gemaakt). Het gebruikte CO₂ heeft zelf geen energiewaarde meer en wordt in het FT-proces gekoppeld aan de waterstof, en daarmee energetisch weer 'opgewaardeerd' tot een koolwaterstof, e-kerosine in dit geval. Er is wel energie nodig om pure CO₂ af te vangen, maar deze specifieke energievraag is niet mee genomen in de scope van deze studie²⁹.

HEFA vereist de op één na grootste hoeveelheid waterstof, ongeveer 12 keer minder dan FT e-kerosine. Alcohol-to-Jet vereist weer slechts de helft van de hoeveelheid waterstof in vergelijking met HEFA, maar nog altijd ruim twee keer meer waterstof dan nodig voor de productie van fossiele kerosine. Ten slotte is het van belang op te merken dat de productie van biokerosine via het Fischer-Tropsch proces geen additioneel waterstof nodig heeft in het raffinageproces, omdat deze brandstof kan worden geraffineerd met de waterstof die al in de biomassa zit. Dit kan van belang zijn in situaties waar beschikbaarheid van hernieuwbare waterstof beperkt is.

Tabel 9. Waterstofverbruik voor het raffineren van verschillende brandstoftypes (namelijk SAF en fossiele kerosine)^{30,31,32}.

Brandstoftype	Waterstofverbruik [kg H ₂ /ton brandstof]	Waterstofverbruik [PJ H ₂ /PJ brandstof]
Fischer-Tropsch e-kerosine (van CO ₂ en elektriciteit)	616	1,675
HEFA (van gebruikte frituurvet)	52	0,141
Alcohol-to-Jet	27	0,073
Fossiele kerosine	12	0,032
Fischer-Tropsch biokerosine (van bosbouwresiduen)	0	0

Een kanttekening hierbij is dat bij de productie van biobrandstoffen volgens de huidige wetgeving nog geen eisen aan het hernieuwbare karakter van waterstof hoeven te worden gesteld³³. Dit komt vooral doordat de waterstofbehoefte relatief laag is (zie Tabel 9), omdat het grootste deel van de energie van biobrandstof afkomstig is van de biomassa. Fischer-Tropsch e-kerosine daarentegen vereist productie op basis van hernieuwbare waterstof uit hernieuwbare elektriciteit³³, omdat al zijn energie afkomstig is van de waterstof. Op het

²⁹ De energievraag voor het afvangen van CO₂ is afhankelijk van factoren zoals bijvoorbeeld de CO₂ concentratie van de emissies, de CO₂ afvangtechnologie en de buitentemperatuur. Op basis van deze onzekerheden hebben we de energievraag van CO₂ afvang niet meegenomen in onze studie.

³⁰ Berekend vanaf Capaz et al. (2020) – The carbon footprint of alternative jet fuels produced in Brazil: exploring different approaches

³¹ Berekend vanaf Marchese et al. (2021) – CO₂ from direct air capture as carbon feedstock for Fischer-Tropsch chemicals and fuels: Energy and economic analysis

³² Berekend vanaf Digital Refining (2009) – Hydrogen generation for modern refineries

³³ Europese Commissie (2018) – Hernieuwbare energierichtlijn (RED II).

moment vindt productie van bio-SAF voornamelijk nog plaats met fossiele waterstof. Maar op den duur verwachten we dat ook biobrandstoffen steeds meer geraffineerd moeten worden met hernieuwbare waterstof.

3.4.1 Waterstofvraag op basis van ReFuelEU Aviation

De mandaten van ReFuelEU Aviation geven aan welk deel van de totale geleverde luchtvaartbrandstoffen SAF moeten zijn, en welk deel daarvan e-SAF. Hoe de SAF-mix er verder uit ziet hangt af van veel factoren. Daarom maken we een intervalschatting van de totale waterstofvraag op basis van een energiemix bestaande uit alleen HEFA en FT e-kerosine en een energiemix bestaande uit bio-FT en FT e-kerosine. Op deze manier berekenen we de minimale (energiemix met HEFA) en maximale (energiemix met bio-FT) waterstofvraag om te voldoen aan de ReFuelEU Aviation mandaten (zie Tabel 9).

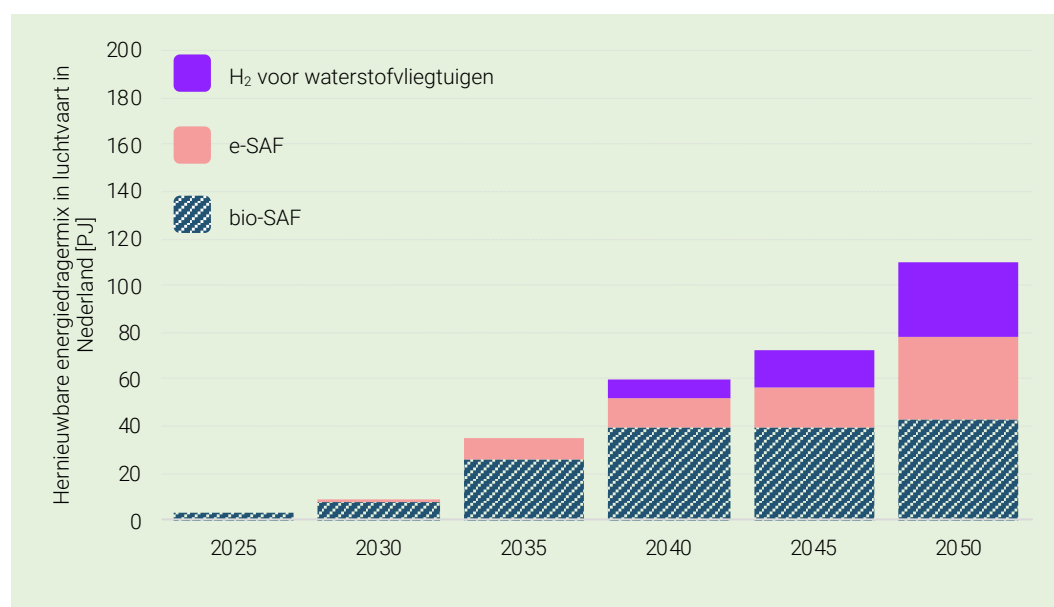
Verder houden we rekening met de in hoofdstuk 3 beschreven technologische scenario's, waardoor in het scenario met een hoog aandeel alternatieve aandrijving ook de waterstofvraag voor direct gebruik meetelt voor de totale waterstofvraag.

Ook berekenen we de hernieuwbare elektriciteitscapaciteit die nodig is om hernieuwbare waterstof te produceren. We gaan hierbij uit van een elektrolyse-efficiëntie van 66% (bij een lage verbrandingswaarde)^{28,29,30}. Verder gebruiken we 3.715 vollasturen voor de geïnstalleerde opwekkingscapaciteit. Dit hebben we berekend op basis van de gemiddelde windenergie op zee voor de periode tussen 2018 en 2020³¹.

Het is belangrijk om op te merken dat productie van de totale berekende SAF- en waterstofvraag niet in Nederland hoeft te gebeuren, maar ook via import uit landen waar het goedkoper is om SAF of waterstof te produceren, naar Nederland komt.

Scenario met hoog aandeel alternatieve aandrijving

Figuur 3 laat zien hoeveel bio-SAF en e-SAF geleverd moet worden tussen 2025 en 2050 om te voldoen aan de ReFuelEU Aviation verordening. Zoals te zien is, neemt het totale SAF-volume toe van 8,9 PJ in 2030 naar 78 PJ in 2050, waarvan respectievelijk 1,3 PJ en 35 PJ e-SAF is. De opkomst van waterstofvliegtuigen zorgt voor een additionele waterstofvraag van 32 PJ in 2050.

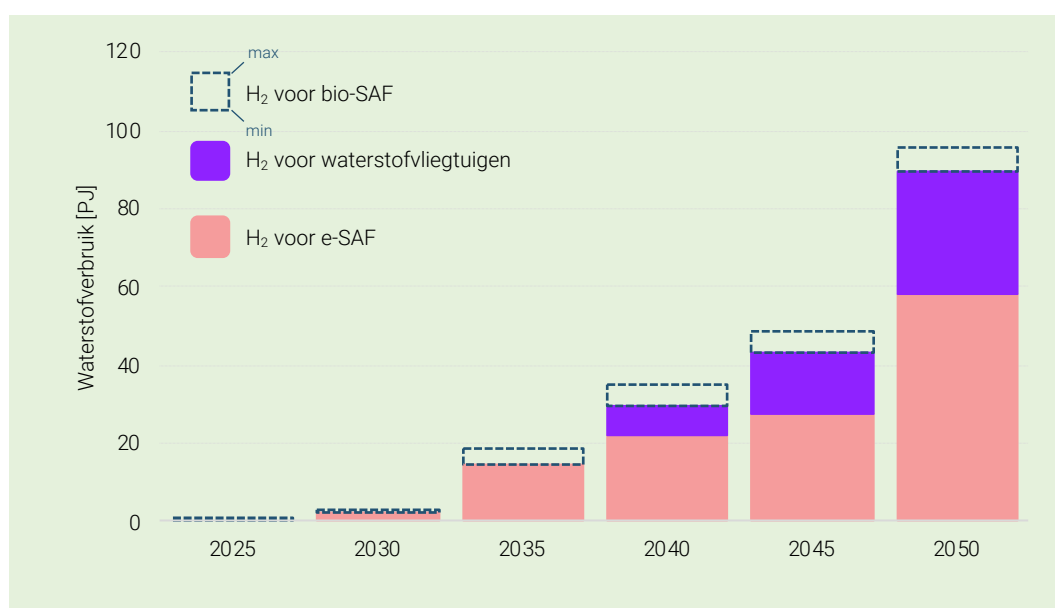


Figuur 3. Mix en volumes van (hernieuwbare) energiedragers die in Nederland in de luchtvaart nodig is voor naleving van ReFuelEU Aviation, in een scenario met hoog aandeel alternatieve aandrijving.

De SAF-vraag in Figuur 3 combineren we vervolgens met de specifieke waterstofvraag voor de raffinage van de verschillende SAF-types (Tabel 9) om de totale waterstofvraag te berekenen. In Figuur 20 in de Bijlagen leggen we uit hoe we de bandbreedte voor de waterstofbehoefte voor de raffinage van bio-SAF berekenen. In Figuur 4 staat de maximale

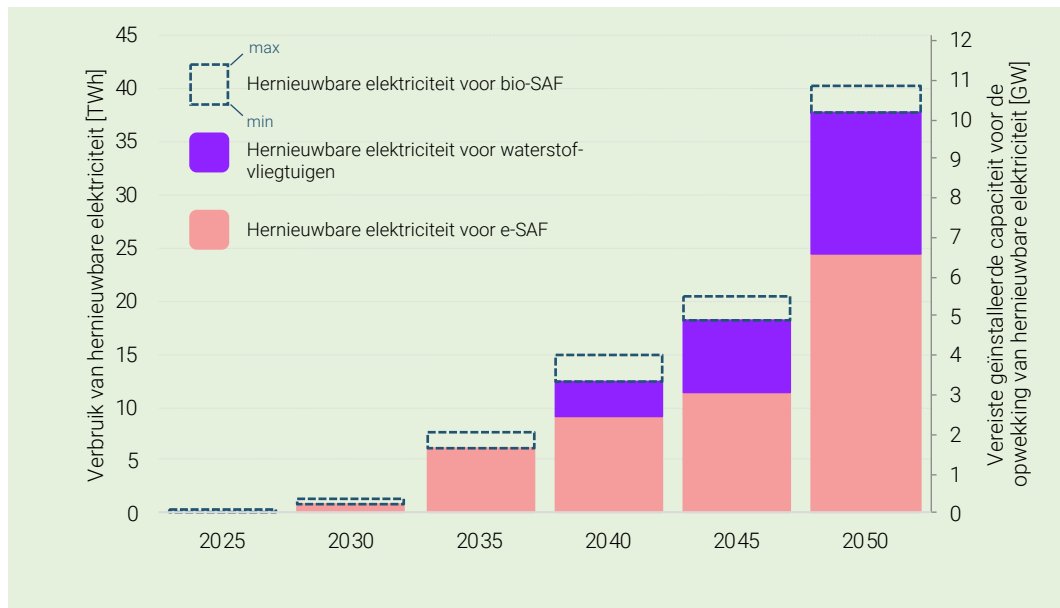
waterstofbehoefte van bovenstaande energiemix weergegeven. Voor 2030 schatten we dat de vraag naar waterstof van SAF tussen 2,1 PJ en 3,2 PJ ligt, waarvan minimaal 2,1 PJ aan hernieuwbare waterstof. Vanwege toenemende mandaten schatten we dat deze vraag in 2050 tussen 58 PJ en 64 PJ ligt. Door de opkomst van waterstofvliegtuigen schatten we boven op de waterstofbehoefte van SAF, 32 PJ aan waterstofvraag voor direct gebruik. Hierdoor zal de totale waterstofvraag tussen 90 PJ en 96 PJ liggen, waarvan minimaal 58 PJ aan hernieuwbare waterstof.

Uit deze bevindingen zien we ook dat in 2050, 94% van het waterstofverbruik afkomstig is van e-SAF productie (61%) en direct waterstofverbruik in waterstofvliegtuigen (33%). Het aandeel waterstofverbruik van deze twee categorieën blijft vanaf 2035 consequent boven de 85%. Dit benadrukt de grote waterstofintensiteit van e-SAF en waterstofvliegtuigen. Methodologisch gezien benadrukt het verder dat onze aannames over het exacte aandeel van SAF-technologie binnen de productieroutes voor biobrandstoffen de resultaten niet significant beïnvloeden.



Figuur 4. Maximale waterstofvraag voor de raffinage van SAF en voor direct verbruik in waterstofvliegtuigen. De waterstofvraag van bio SAF is op basis van HEFA berekend. De SAF-volumes voldoen aan ReFuelEU Aviation in een scenario met een hoog aandeel alternatieve aandrijving. Bedenk wel dat deze hoeveelheden waterstof ook in het buitenland kunnen worden geproduceerd en als waterstof of als e-SAF kunnen worden geïmporteerd.

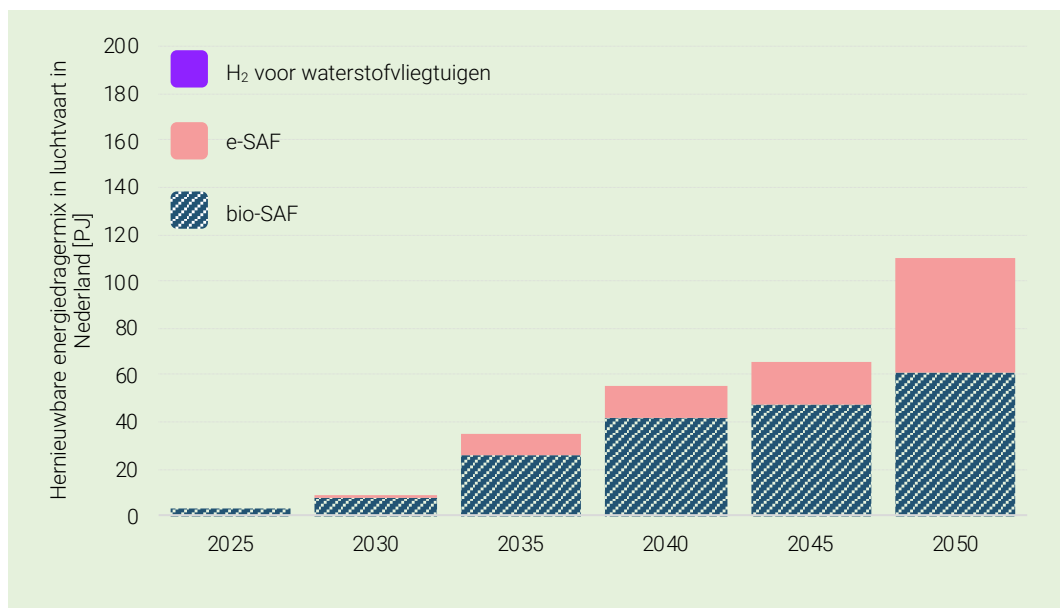
We schatten dat de benodigde productiecapaciteit voor hernieuwbare elektriciteit voor deze benodigde waterstof tussen de 0,2 en 0,4 GW ligt in 2030. In 2050 schatten we dat de productiecapaciteit voor hernieuwbare elektriciteit tussen de 10 GW en 11 GW ligt, waarvan minimaal 6,5 GW nodig is om te voldoen aan de mandaten van ReFuelEU Aviation (zie Figuur 5).



Figuur 5. De capaciteit [GW] voor de opwekking van hernieuwbare elektriciteit en het totale energieverbruik [TWh] voor de hernieuwbare waterstofvraag van de productie van e-FT, het raffineren van bio-SAF en voor direct verbruik van waterstofvliegtuigen. De elektriciteitsvraag werd geraamd op basis van een (lagere verbrandingswaarde) energie-efficiëntie van elektrolyse van 66%. De capaciteit werd geschat op basis van 3715 vollasturen per jaar.

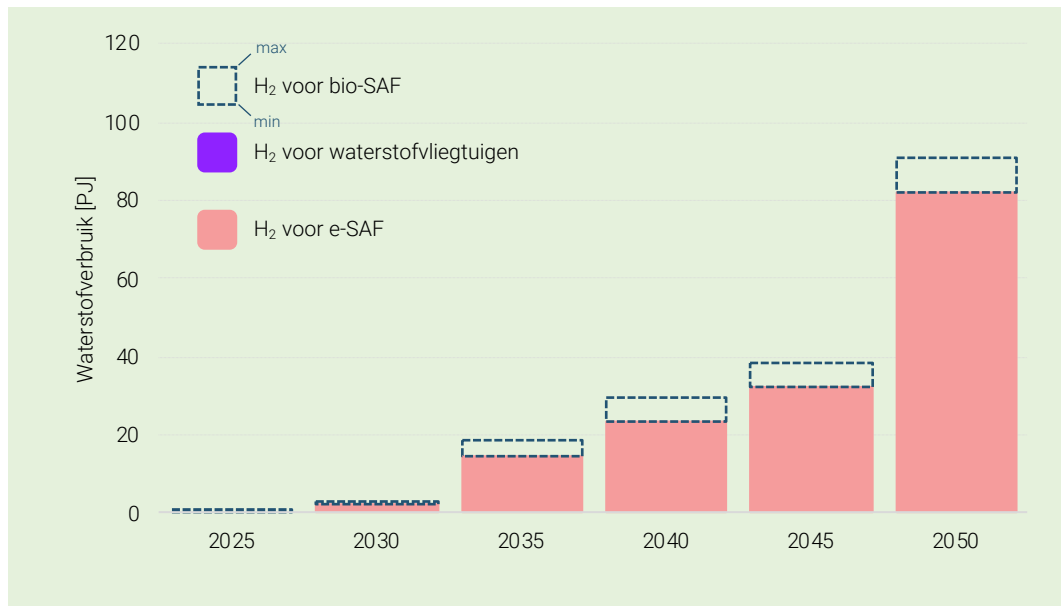
Scenario met laag aandeel alternatieve aandrijving

Figuur 6 laat zien wat het volume aan bio-SAF en e-SAF moet zijn tussen 2025 en 2050 om te voldoen aan de ReFuelEU Aviation verordening. Het totale SAF-volume in 2030 is naar schatting 8,9 PJ, waarvan 1,3 PJ e-SAF is. In 2050 is het totale SAF-volume 110 PJ waarvan 49 PJ e-SAF is.



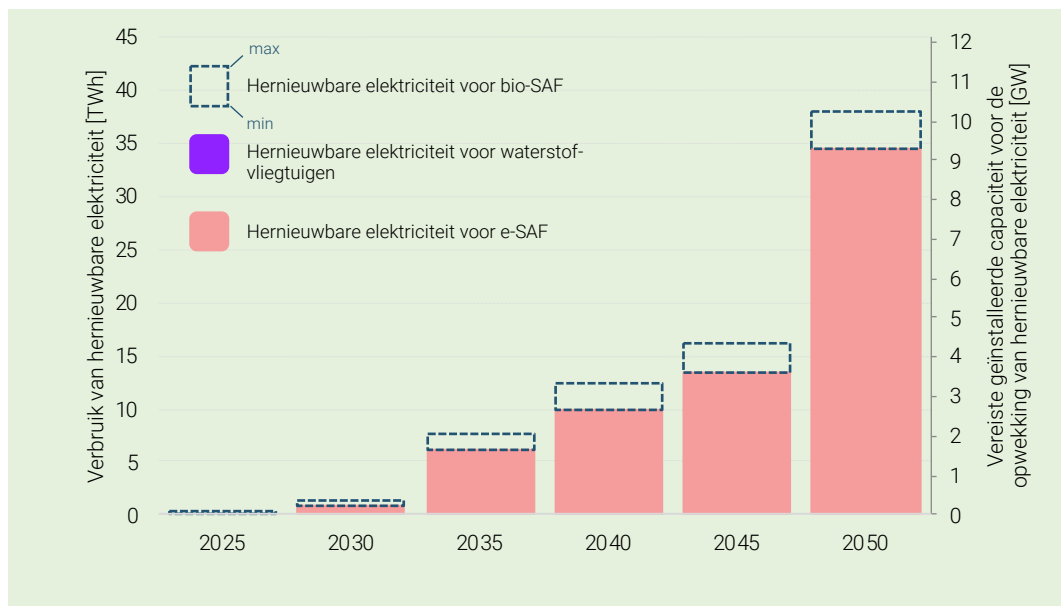
Figuur 6. Mix en volumes van (hernieuwbare) energiedragers die in Nederland in de luchtvaart nodig zijn voor naleving van ReFuelEU Aviation, in een scenario met een laag aandeel alternatieve aandrijving.

De benodigde hoeveelheid waterstof in dit scenario staat weergegeven in Figuur 7. We schatten dat de waterstofvraag in 2030 tussen 2,1 PJ en 3,2 PJ ligt, waarvan minimaal 2,1 PJ hernieuwbaar moet zijn. De toenemende mandaten zorgen ervoor dat in 2050 de waterstofvraag tussen 82 PJ en 91 PJ ligt, waarvan minimaal 82 PJ hernieuwbaar moet zijn.



Figuur 7. Maximale waterstofverbruik voor de raffinage van SAF en voor direct verbruik in waterstofvliegtuigen. De waterstofvraag van bio-SAF is op basis van HEFA berekend. De SAF-volumes voldoen aan ReFuelEU Aviation in een scenario met lage innovatiegraad. Bedenk wel dat deze hoeveelheden waterstof ook in het buitenland kunnen worden geproduceerd en als waterstof of als e-SAF kunnen worden geïmporteerd.

We schatten dat de productiecapaciteit voor hernieuwbare elektriciteit voor deze hoeveelheid waterstof tussen de 0,2 GW en 0,4 GW ligt in 2030. In 2050 schatten we dat de productiecapaciteit voor hernieuwbare elektriciteit om voldoende waterstof te produceren tussen de 9,3 GW en 10,3 GW ligt (zie Figuur 8).



Figuur 8. De capaciteit [GW] voor de opwekking van hernieuwbare elektriciteit en het totale energieverbruik [TWh] voor de hernieuwbare waterstofvraag van de productie van e-FT en het raffineren van bio-SAF. De elektriciteitsvraag werd geraamd op basis van een (lagere verbrandingswaarde) energie-efficiëntie van elektrolyse van 66%. De capaciteit werd geschat op basis van 3715 vollasturen per jaar.

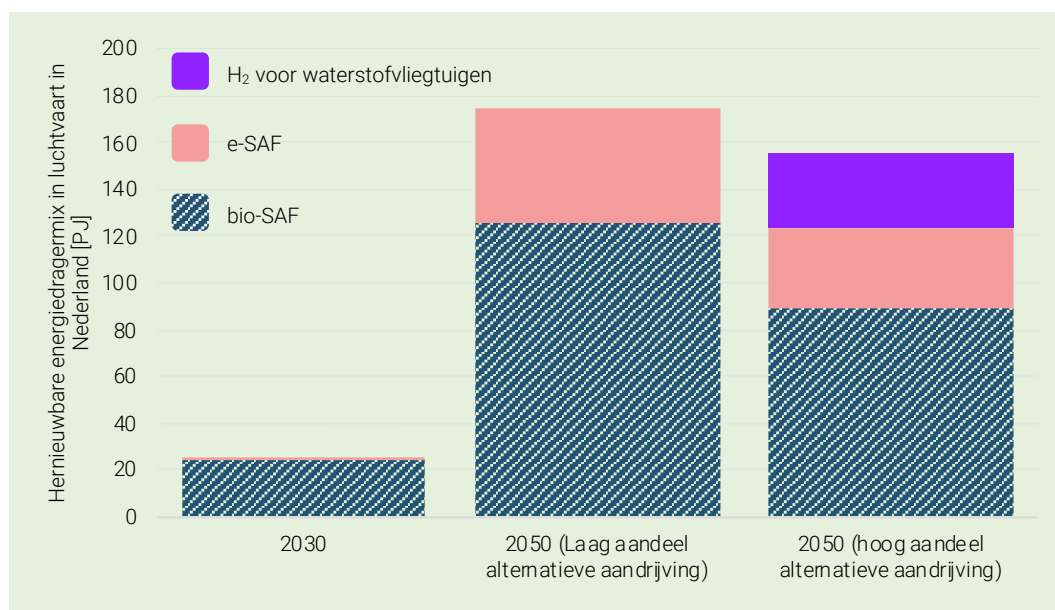
3.4.2 Waterstofvraag op basis van de Luchtvaartnota

De Luchtvaartnota streeft naar een SAF-aandeel van 14% in 2030 en 100% in 2050. Om de totale waterstofvraag te berekenen gaan we voor het aandeel e-SAF uit van de mandaten van ReFuelEU Aviation.

Verder houden we net zoals in de schattingen hierboven ook rekening met de in hoofdstuk 3 beschreven technologische scenario's. Eveneens gebruiken we een elektrolyse-efficiëntie

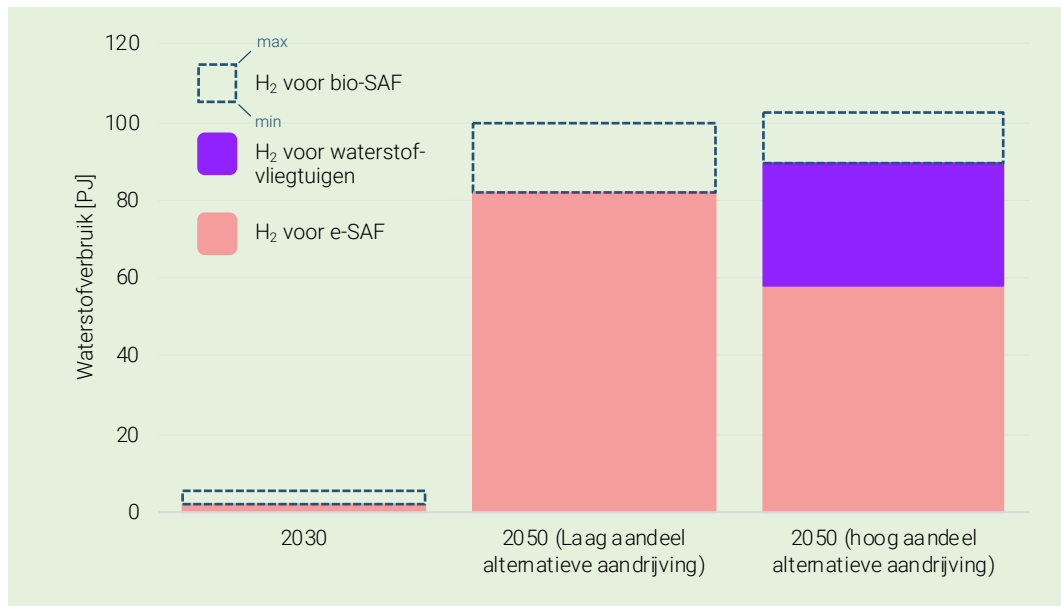
van 66% (bij een lage verbrandingswaarde)^{28,29,30} en gaan we uit van 3.715 vollasturen voor de geïnstalleerde opwekkingscapaciteit voor elektriciteit geproduceerde via windmolens op zee³¹.

In Figuur 9 staat de totale hoeveelheid SAF weergegeven voor 2030 en 2050. In 2030 is onder de Luchtvaartnota naar schatting 25 PJ aan SAF nodig waarvan 1,3 PJ aan e-SAF om te voldoen aan de mandaten van ReFuelEU Aviation. In 2050 is de totale SAF vraag 175 PJ, waarvan 49 PJ aan e-SAF en 126 PJ aan bio-SAF voor het scenario met laag aandeel alternatieve aandrijving. De totale energievraag in het scenario met een hoog aandeel alternatieve aandrijving is 158 PJ, waarvan 35 PJ aan e-SAF, 89 PJ aan bio-SAF en 32 PJ aan waterstof voor direct gebruik door waterstofvliegtuigen.



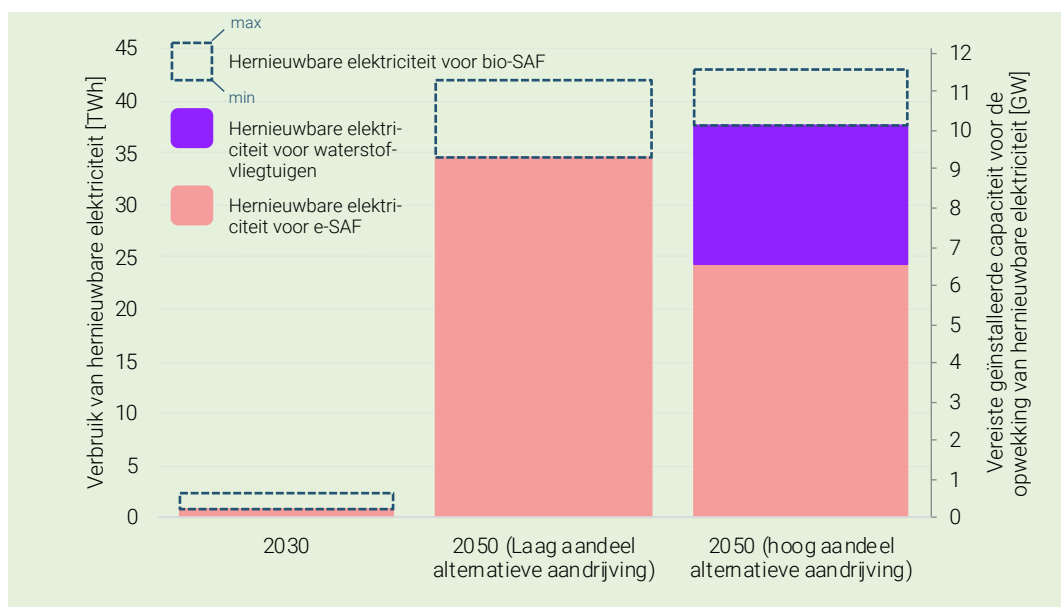
Figuur 9. Mix en volumes van (hernieuwbare) energiedragers die in Nederland in de luchtvaart nodig zijn voor naleving van de Luchtvaartnota en de e-SAF mandaten in de ReFuelEU Aviation.

De benodigde hoeveelheden waterstof staan weergegeven in Figuur 10. De waterstofvraag van SAF - en daarmee de totale waterstofvraag in 2030 - ligt naar schatting tussen 2,1 PJ en 5,5 PJ, waarvan minimaal 2,1 PJ hernieuwbaar is voor de productie van e-SAF. In 2050 ligt de totale waterstofvraag in het scenario met een laag aandeel alternatieve aandrijving naar schatting tussen 82 PJ en 100 PJ, waarvan minimaal 82 PJ hernieuwbaar is. In het scenario met een hoog aandeel alternatieve aandrijving ligt de waterstofvraag van SAF in 2050 naar schatting tussen 58 PJ en 70 PJ, waarvan minimaal 58 PJ hernieuwbaar is voor de productie van e-SAF. Door de opkomst van alternatieve aandrijving schatten we 32 PJ aan waterstof voor direct gebruik, boven op de vraag naar waterstof voor SAF. Hierdoor ligt de totale waterstofvraag in het scenario met een hoog aandeel alternatieve aandrijving naar schatting tussen 90 PJ en 102 PJ in 2050.



Figuur 10. Waterstofverbruik voor de raffinage van SAF en voor direct verbruik in waterstofvliegtuigen. De totale SAF-volumes voldoen aan de Luchtvaartnota en de e-SAF-volumes voldoen aan de ReFuelEU Aviation. Bedenk wel dat deze hoeveelheden waterstof ook in het buitenland kunnen worden geproduceerd en als waterstof of als e-SAF kunnen worden geïmporteerd

We schatten dat de benodigde productiecapaciteit van hernieuwbare elektriciteit om deze volumes waterstof te produceren in 2030 tussen de 0,2 GW en 0,6 GW ligt, waarvan minimaal 0,2 GW nodig is om te voldoen aan de mandaten van ReFuelEU Aviation. Voor het scenario met een laag aandeel alternatieve aandrijving in 2050 schatten we dat de productiecapaciteit voor hernieuwbare elektriciteit tussen de 9,3 GW en 11,3 GW moet liggen, waarvan 9,3 GW minimaal nodig is om te voldoen aan de mandaten van ReFuelEU Aviation (zie Figuur 11). In het scenario met een hoog aandeel alternatieve aandrijving schatten we dat de productiecapaciteit voor hernieuwbare elektriciteit voor de hernieuwbare waterstof tussen 10,1 GW en 11,6 GW ligt, waarvan minimaal 6,5 GW nodig is om te voldoen aan de mandaten van ReFuelEU Aviation.



Figuur 11. De capaciteit [GW] voor de opwekking van hernieuwbare elektriciteit en het totale energieverbruik [TWh] voor de hernieuwbare waterstofvraag van de productie van e-FT en het raffineren van bio-SAF en voor direct verbruik van waterstofvliegtuigen. De elektriciteitsvraag werd geraamd op basis van een (lagere verbrandingswaarde) energie-efficiëntie van elektrolyse van 66%. De capaciteit werd geschat op basis van 3715 vollasturen per jaar. Bedenk wel dat deze elektriciteit ook in het buitenland kunnen worden geproduceerd en als waterstof of als e-SAF kunnen worden geïmporteerd.

4 Productie van duurzame luchtvaartbrandstoffen in Nederland

Het vorige hoofdstuk onderzocht hoeveel (hernieuwbare) waterstof nodig is om te voldoen aan de mandaten van ReFuelEU Aviation en de ambities van de Luchtvaartnota. In dit hoofdstuk verkennen we hoeveel SAF-productie daadwerkelijk in Nederland plaatsvindt of zal plaatsvinden en hoeveel waterstof nodig is voor deze (bestaande en aangekondigde) productie. Verder kijken we in dit hoofdstuk hoe de SAF-productie in Nederland zich verhoudt tot de mandaten van ReFuelEU Aviation.

4.1 Projectie 2030: Aangekondigde SAF raffinaderijen in Nederland

Volgens Argus Media (juni 2022) zijn er vijf SAF-productievestigingen in Nederland aangekondigd: de HEFA-fabriek van SkyNRG in Delfzijl (DSL-01), de HEFA-fabriek van Neste in Rotterdam, de HEFA-fabriek van Shell in Rotterdam, de Fischer-Tropsch biokerosinefabriek van Enerkem in Rotterdam (Waste-to-Jet) en de Fischer-Tropsch e-kerosine-fabriek van Synkero in Amsterdam (Power-to-Jet). In de tussentijd kondigde Neste nog een opschaling van zijn aangekondigde faciliteit aan vanaf 2026.



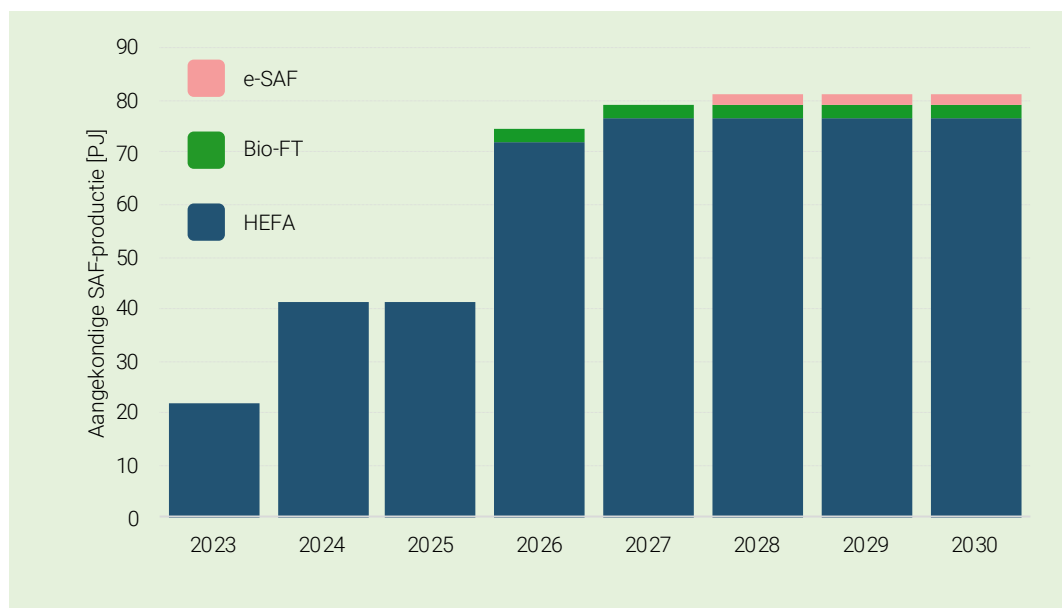
Figuur 12. Aangekondigde SAF fabrieken in Nederland.

De aangekondigde productievolumes in ton per jaar en petajoule per jaar staan weergegeven in Tabel 10.

Tabel 10. Aangekondigde SAF-productiecapaciteit in Nederland³⁴.

Bedrijf	SAF-type	Volume [ton per jaar]	Energievolume [PJ per jaar]	Productie vanaf
Neste	HEFA	500.000	22 PJ	2023
Shell	HEFA	436.000	19,2 PJ	2024
Enerkem	FT biokerosine	60.000	2,6 PJ	2025-2026
Neste (na opschaling)	HEFA	1.200.000	52,9 PJ	vanaf 2026
SkyNRG	HEFA	100.000	4,4 PJ	2025-2027
Synkero	FT e-kerosine	50.000	2,2 PJ	2027

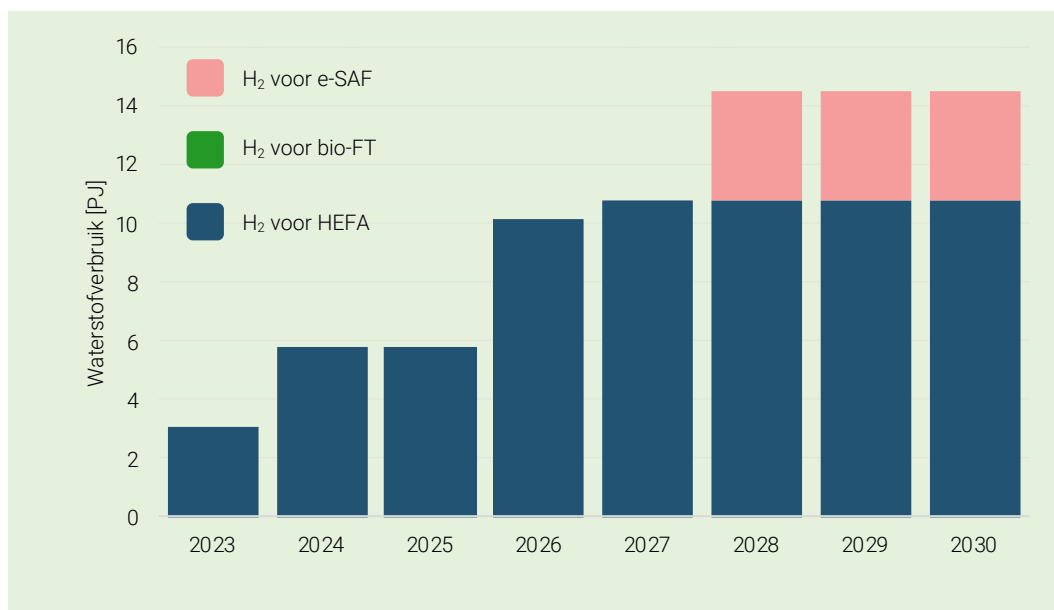
Figuur 13 laat zien dat de productiecapaciteit naar verwachting verdubbelt van 41 PJ in 2025 naar 81 PJ in 2030 op basis van de productievolumes van deze installaties. De figuur laat ook duidelijk zien dat HEFA het grootste aandeel heeft met 94% van de totale SAF-productie in 2030. De productie van FT e-kerosine is naar verwachting 2,2 PJ per jaar vanaf 2028 en de productie van bio-SAF is 22 PJ per jaar in 2023 en schaal op naar 79,1 PJ per jaar vanaf 2027. Dit zou genoeg moeten zijn voor de Nederlandse luchtvaart om tot 2030 te voldoen aan de mandaten van ReFuelEU Aviation (zie Tabel 7), mits het geproduceerde SAF-volume niet geëxporteerd wordt. Zonder verdere verhoging van de productiecapaciteit voor FT e-kerosine zal vanaf 2035 de e-SAF-productie onvoldoende zijn voor de Nederlandse luchtvaart om te voldoen aan de mandaten van ReFuelEU Aviation.



Figuur 13. Aangekondigde SAF-productiecapaciteit in Nederland per type en tijdstip.

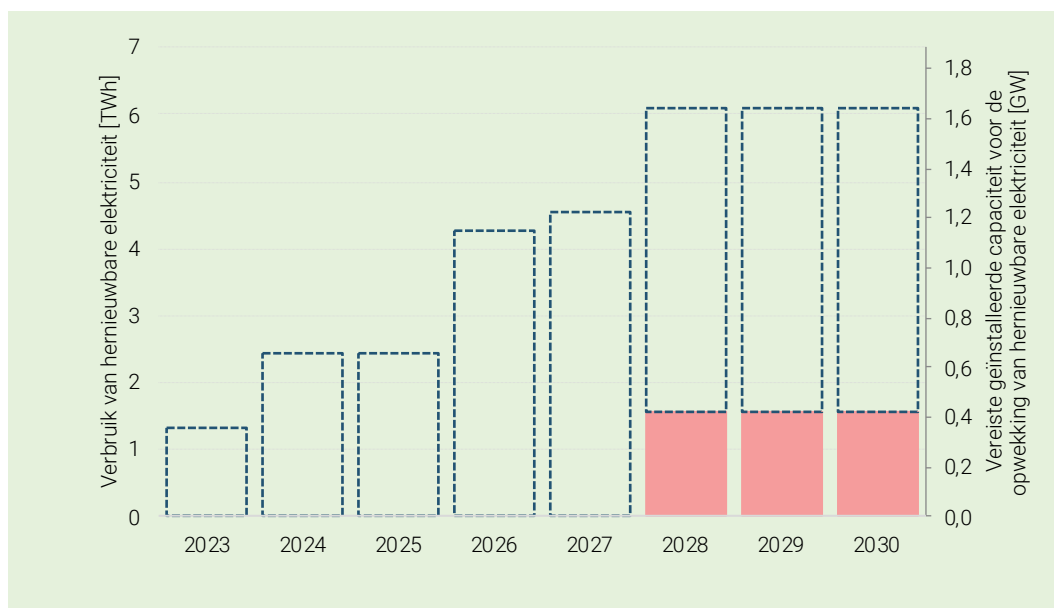
Figuur 14 laat de waterstof vraag van de aangekondigde productiefaciliteiten zien voor de productie van SAF. In 2030 is naar verwachting 14,5 PJ aan waterstof nodig, waarvan 3,7 PJ hernieuwbaar is voor de productie van FT e-kerosine.

³⁴ Argus Media, 2022, SAF global project landscape. Amsterdam, presentatie tijdens SAF Conferentie, Amsterdam, juni 2022.



Figuur 14. Vraag naar waterstof van de aangekondigde productie van SAF per type in Nederland in van 2023 tot en met 2030.

De capaciteit voor hernieuwbare elektriciteit die nodig is om te voldoen aan de vraag naar hernieuwbare waterstof voor de aangekondigde productiefaciliteiten ligt tussen 0,4 GW en 1,6 GW in 2030 (zie Figuur 15).



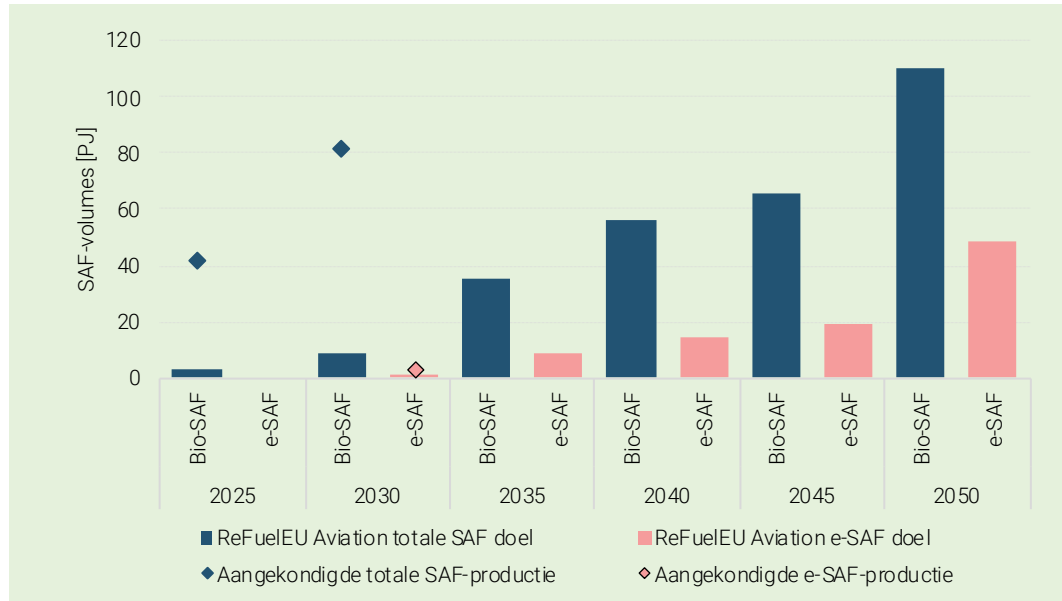
Figuur 15. De capaciteit [GW] voor de opwekking van hernieuwbare elektriciteit en het totale energieverbruik [TWh] voor de hernieuwbare waterstofvraag van de aangekondigde productiefaciliteiten. De elektriciteitsvraag werd geraamd op basis van een (lagere verbrandingswaarde) energie-efficiëntie van elektrolyse van 66%. De capaciteit werd geschat op basis van 3715 vollasturen per jaar.

Figuur 16 laat zien hoe de in Nederland aangekondigde productievolume zich verhouden tot de ReFuelEU Aviation mandaten. Zoals te zien zijn de aangekondigde SAF-productievolume meer dan genoeg om aan de mandaten te voldoen. De totale SAF-productie (blauwe ster) in 2025 is twaalfmaal hoger dan het mandaat (blauwe balken) voor de Nederlandse luchtvaart, en in 2030 is het 9x hoger dan het mandaat. Theoretisch zou het mogelijk zijn om tot en met het tijdsblok 2045-2049 aan het biomandaat van ReFuelEU Aviation te voldoen.

De aangekondigde e-SAF productie (roze ster) is ongeveer 1,8 maal hoger dan het mandaat in 2030 (roze balken). Vanaf 2035 zal de e-SAF productie significant opgeschaald moeten

worden om te voldoen aan de ReFuelEU mandaten, tenzij er gekozen wordt om e-SAF van elders te importeren.

Op basis van deze bevindingen, vermoeden we dat de Nederlandse SAF-producenten zich richten op de exportmarkt. De binnenlandse SAF-productie garandeert namelijk niet dat Nederland aan de mandaten kan voldoen, aangezien SAF-producenten niet verplicht zijn om SAF aan de Nederlandse luchtvaartsector te leveren.



Figuur 16. Aangekondigde SAF-productievolumes in vergelijking met de ReFuelEU Aviation-mandaten. Merk echter op dat Nederlandse SAF-producenten hun hernieuwbare brandstoffen op de wereldmarkt verkopen.

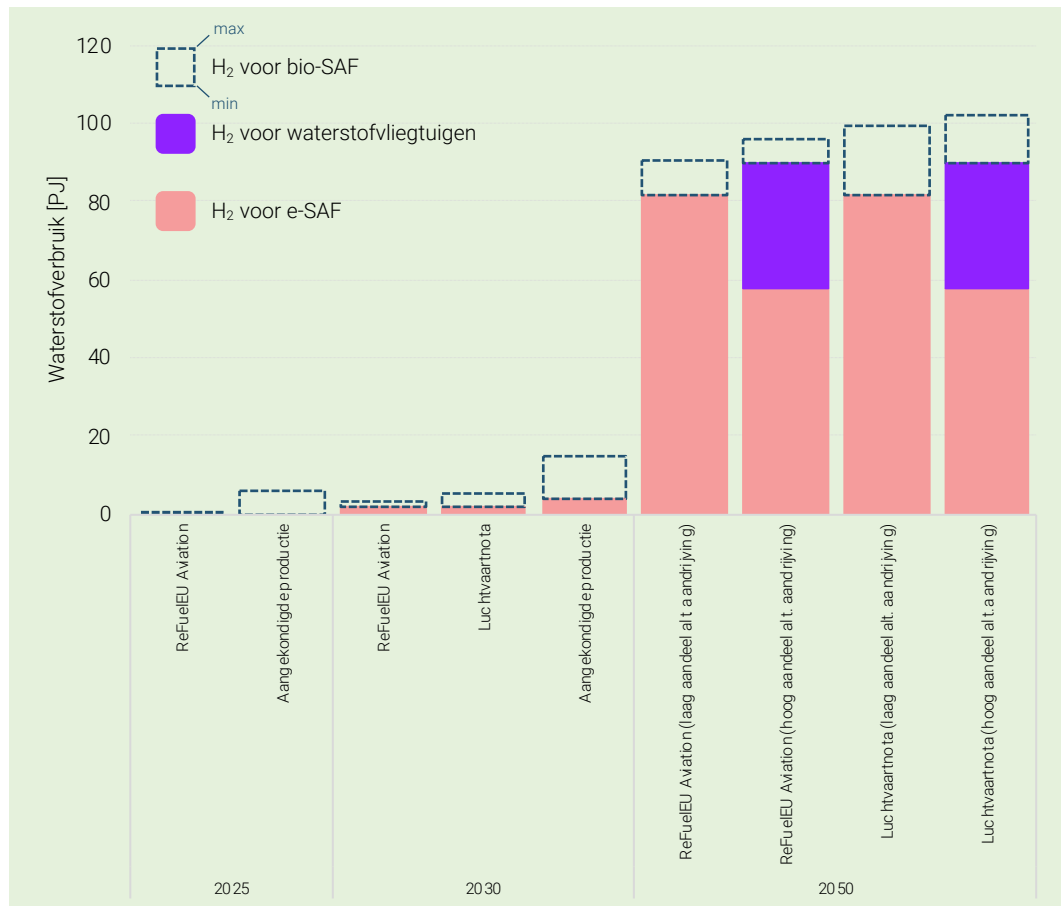
4.2 Samenvatting van de waterstofvraag voor alle scenario's

Door de resultaten uit hoofdstuk 3 en 4 voor de waterstofbehoefte van de Nederlandse luchtvaartsector te combineren (Figuur 17), kan men zien dat de waterstof vraag in 2050 de waterstofvraag in 2025 en 2030 te niet doet.

In 2025 stelt ReFuelEU Aviation e-SAF nog niet verplicht en is de aangekondigde Synkero FT e-kerosine faciliteit ook nog niet operationeel. Dit betekent dat alle waterstof die in 2025 voor de luchtvaartsector nodig is, nodig is voor de raffinage van bio-SAF. Om te voldoen aan het ReFuelEU Aviation mandaat van 2% SAF is 0,5 PJ waterstof nodig. Rekening houdend met de aangekondigde SAF-productie in Nederland is echter al 49 PJ nodig.

Voor 2030 is voor ReFuelEU Aviation 3,2 PJ waterstof nodig, voor de Luchtvaartnota 5,4 PJ waterstof en voor de aangekondigde SAF-productie 14,5 PJ waterstof. Voor de aangekondigde SAF-productie is dus ongeveer 4,6 maal zoveel waterstof nodig als voor de ReFuelEU Aviation en 2,7 maal zoveel als voor de Luchtvaartnota.

Voor 2050 is het verloop van de technologische ontwikkelingen in waterstof- en batterij-elektrische vliegtuigen relevant. We onderzochten de totale SAF-mandaten van ReFuelEU Aviation zonder vlootontwikkelingen (de meest linker balk in 2050), ReFuelEU Aviation met een hoog aandeel alternatieve aandrijving (tweede balk van links in 2050), de Luchtvaartnota-doelstelling met ReFuelEU Aviation e-SAF submandaat zonder vlootontwikkelingen (tweede balk van rechts in 2050), en de Luchtvaartnota-doelstelling met ReFuelEU Aviation e-SAF submandaat met een hoog aandeel alternatieve aandrijving (meest rechter balk in 2050).



Figuur 17. Vergelijking van het waterstofverbruik van alle onderzochte scenario's van de ReFuelEU Aviation en de Luchtvaartnota en de aangekondigde productiecapaciteit. Merk op dat ReFuelEU Aviation en Luchtvaartnota volumes kunnen worden geïmporteerd en niet noodzakelijkerwijs in Nederland worden geproduceerd.

In 2050 is de waterstofvraag 17 tot 32 maal hoger dan in 2030. In vergelijking met de aangekondigde SAF-productiecapaciteit voor 2030 stijgt de waterstofvraag in 2050 nog met een factor 6,3 tot 7,1. De e-SAF submandaat onder ReFuelEU Aviation levert in alle vier de scenario's de grootste waterstofvraag op (58 PJ in het scenario met een hoog aandeel alternatieve aandrijving en 82 PJ in het scenario met een laag aandeel alternatieve aandrijving). In het scenario met een hoog aandeel alternatieve aandrijving verbruikt waterstof voor direct verbruik in waterstofvliegtuigen nog eens 32 PJ waterstof. Een groter aandeel alternatieve aandrijving in de vloot leidt dus ook tot een hoger waterstofverbruik. De hogere efficiëntie van de vloot en de verminderde totale vraag naar luchtvaartbrandstoffen kunnen in onze schatting niet opwegen tegen de hoge direct waterstofverbruik van waterstofvliegtuigen.

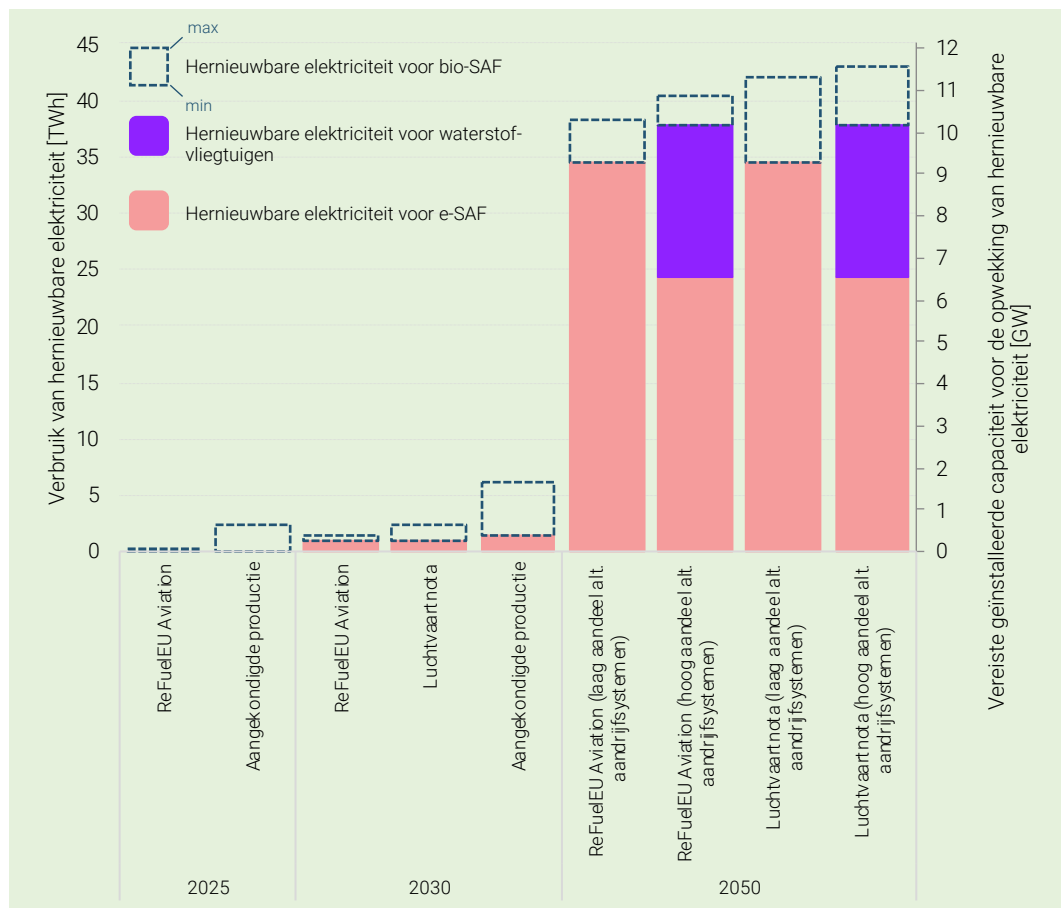
Figuur 18 hieronder laat de voor dit volume waterstof benodigde hoeveelheid hernieuwbare elektriciteit (in terawattuur, linkeras) en de daarvoor benodigde geïnstalleerde opwekkingscapaciteit (in gigawatt, rechteras) zien. De ReFuelEU Aviation verordening verplicht het gebruik van hernieuwbare waterstof voor de raffinage van e-SAF. In onze berekening zijn we ervan uitgegaan dat het rechtstreekse gebruik van waterstof voor waterstofvliegtuigen ook hernieuwbare waterstof moet zijn, aangezien het gebruik van fossiele waterstof netto gezien tot evenveel broeikasgasemissies zou resulteren als fossiele kerosine. Voor de raffinage van bio-SAF is op het moment niet verplicht om hernieuwbare waterstof te gebruiken. Met het oog op een klimaatneutrale toekomst, kan wel verwacht worden dat in 2050 de meeste waterstof voor de raffinage van bio-SAF hernieuwbaar moet zijn. Vanwege deze onzekerheden hebben we de vraag naar hernieuwbare elektriciteit en de daarvoor benodigde opwekkingscapaciteit van bio-SAF aangegeven in stippellijnen. De bovenkant van de balken geeft dan als resultaat de maximaal vereiste hernieuwbare elektriciteit, als alle waterstof hernieuwbaar moet zijn.

In 2025 is geen hernieuwbare elektriciteit vereist voor de productie van de gemandateerde volumes. Als alle door ReFuelEU Aviation gemandateerde bio-SAF uit hernieuwbare waterstof zou worden geproduceerd, zou de behoefte aan hernieuwbare elektriciteit ongeveer 0,2 TWh bedragen. Voor de aangekondigde SAF-productiecapaciteit voor 2025 bedraagt de maximaal vereiste hernieuwbare elektriciteit 12 keer zoveel, namelijk 2,5 TWh.

Vanaf 2030 introduceert ReFuelEU Aviation het submandaat voor e-SAF van 0,7% van de totale SAF-vraag. Dit submandaat vereist 0,9 TWh hernieuwbare elektriciteit. De resterende doelstelling voor bio-SAF kan oplopen tot maximaal 0,5 TWh boven op de hernieuwbare elektriciteit die nodig is voor het e-SAF mandaat. Voor de Luchtvaartnota daarentegen bedraagt de maximaal vereiste hernieuwbare elektriciteit om alle bio-SAF met hernieuwbare waterstof te raffineren 1,4 TWh (boven op de hernieuwbare elektriciteit die nodig is voor het ReFuelEU Aviation e-SAF mandaat). Voor de aangekondigde SAF-productiefaciliteiten voor 2030 in Nederland zal naar verwachting 1,6 TWh hernieuwbare elektriciteit nodig zijn (Synkero-fabriek) en nog eens 4,5 TWh als alle bio-SAF met hernieuwbare waterstof zou worden geraffineerd. Voor de productie van deze aangekondigde volumes is een geïnstalleerde capaciteit voor de opwekking van hernieuwbare elektriciteit van 0,4 tot 1,6 GW nodig.

De bovengenoemde groei van 16-32 maal van de behoefte aan hernieuwbare waterstof van 2030 tot 2050 leidt ook tot een grote toename van de behoefte aan hernieuwbare elektriciteit. Afhankelijk van het scenario bedraagt de vraag naar hernieuwbare elektriciteit 38 TWh op basis van ReFuelEU Aviation zonder alternatieve aandrijving en 43 TWh op basis van de Luchtvaartnota met alternatieve aandrijvingen). Voor de productie van deze volumes is een geïnstalleerde capaciteit voor de opwekking van hernieuwbare elektriciteit van respectievelijk 9,3 GW en 11,6 GW nodig (gebaseerd op wind-op-zee productie).

Hoewel de invoering van een groot aandeel van met waterstofcellen uitgeruste elektrische vliegtuigen 10,2 TWh kan besparen, omdat zij kerosine vervangen en daardoor de verplichte e-SAF-volumes verlagen, is ook 13,4 TWh extra nodig voor de productie van hernieuwbare waterstof. De invoering van waterstofvliegtuigen leidt dus tot een hoger verbruik van hernieuwbaar elektriciteit.



Figuur 18. Vergelijking van de vereiste hernieuwbare elektriciteit en de opwekkingscapaciteit daarvan van alle onderzochte scenario's van de ReFuelEU Aviation en de Luchtvaartnota en de aangekondigde capaciteit. De elektriciteitsvraag werd geraamd op basis van een (lagere verbrandingswaarde) energie-efficiëntie van elektrolyse van 66%. De capaciteit werd geschat op basis van 3715 vollasturen. Merk op dat ReFuelEU Aviation en Luchtvaartnota volumes kunnen worden geïmporteerd en niet noodzakelijkerwijs in Nederland worden geproduceerd.

5 Waterstofvraag ten opzichte van andere sectoren

De submandaten van ReFuelEU Aviation voor e-SAF vormen een nieuwe vraag naar de productie van hernieuwbare waterstof. Andere sectoren, zoals wegtransport, industrie en gebouwde omgeving, zijn echter al in beeld geweest voor nieuwe toepassing van waterstof. Voor deze sectoren heeft het Klimaatakkoord al de doelstelling geformuleerd van 500 MW elektrolysecapaciteit in 2025 en 3-4 GW aan capaciteit in 2030. Deze elektrolysecapaciteit zou dus een aanvulling zijn op de capaciteiten die in deze studie voor e-SAF zijn uitgewerkt. Het Nationaal Waterstof Programma³⁵ heeft een Routekaart Waterstof ontwikkeld om dit doel te helpen bereiken (Figuur 19).



Figuur 19. Routekaart Waterstof van het Nationaal Waterstof Programma³⁶.

Uit het rapport voor de Routekaart blijkt dat er 1 PJ waterstof is voorzien in het wegvervoer in 2025 en 18-58 PJ in 2030. Uitgaande van een elektrolyse-efficiëntie van ongeveer 66% en ongeveer 3.715 vollasturen per jaar aan hernieuwbare elektriciteitsopwekking, is voor de in de Routekaart genoemde 18-58 PJ ongeveer tussen 2 tot 6,6 GW geïnstalleerd vermogen aan hernieuwbare elektriciteit nodig.

Bovendien is er volgens de Routekaart 600 MW nodig in de industrie in 2025, oplopend tot 40-80 PJ in 2030. Met dezelfde aannames als in de vorige alinea, is voor de in de Routekaart genoemde 40-80 PJ ongeveer 4,5 tot 9,1 GW geïnstalleerde capaciteit aan hernieuwbare elektriciteit nodig.

Dit betekent dat voor industrie en vervoer tussen 6,6 en 15,6 GW aan geïnstalleerde hernieuwbare elektriciteitscapaciteit nodig is om aan de vraag naar waterstof in deze twee sectoren in Nederland te voldoen. De Routekaart bepaalt echter ook dat van deze volumes 80 PJ in Nederland moet worden geproduceerd en de rest uit andere landen moet worden geïmporteerd. De vereiste geïnstalleerde capaciteit van hernieuwbare elektriciteitsopwekking in Nederland moet dus tegen 2030 ongeveer 9,1 GW bedragen.

³⁵ Het Nationale Waterstof Programma is ontstaan vanuit het Klimaatakkoord. Het is een sectorinitiatief met verschillende industriële en maatschappelijke organisaties. Meer informatie is hier te vinden: <https://nationaalwaterstofprogramma.nl/over-ons/default.aspx>

³⁶ Routekaart Waterstof (link [hier](#)). Website geraadpleegd op 10 november 2022.

Zoals vermeld in hoofdstuk 3.3, bedraagt de elektriciteitsproductiecapaciteit die nodig is voor de ReFuelEU Aviation e-SAF-mandaten voor 2030 ongeveer 0,2 GW. De luchtvaartsector heeft dus slechts ongeveer 2,6% van de totale opwekkingscapaciteit voor hernieuwbare elektriciteit voor elektrolyse nodig volgens de Routekaart. Dit is vooral te wijten aan de late en kleinschalige invoering van (e-)SAF-mandaten in ReFuelEU Aviation (0,7% van SAF tegen 2030 moet e-SAF zijn), maar ook aan de hogere ambities in de industriesector en het wegvervoer.

Een kanttekening hierbij is dat ReFuelEU Aviation waarschijnlijk in de komende periode tot juridisch bindende EU-regelgeving zal ontwikkelen, terwijl de Routekaart meer een visie is op de rol van waterstof binnen Nederland. Daarom is de grote discrepantie tussen de (meer conservatieve) komende wetgeving ReFuelEU Aviation en de (meer visionaire) Routekaart te verwachten.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Deze studie kijkt naar de waterstofvraag van de Nederlandse luchtvaartsector tussen 2025 en 2050 om te voldoen aan ReFuelEU Aviation en de Luchtvaartnota. Verder vergelijkt de studie deze vraag met de vraag naar waterstof in al aangekondigde productiefaciliteiten voor duurzame vliegtuigbrandstoffen (SAF)³⁷ in Nederland tot 2030. Daarnaast vertaalt de studie de benodigde brandstofvolumes naar het benodigde opwekkingsvolume van duurzame elektriciteit, zowel in terawattuur (TWh) als in gigawatt (GW) geïnstalleerd vermogen.

Samengevat heeft dit rapport de volgende inzichten opgeleverd:

ReFuelEU Aviation leidt tot een grote vraag naar hernieuwbare waterstof en dat gaat gepaard met een additionele vraag naar hernieuwbare elektriciteit

- Om te voldoen aan ReFuelEU Aviation heeft Nederland in 2030 in totaal ongeveer 8,9 PJ SAF nodig. Hiervan moet ongeveer 1,3 PJ e-SAF zijn. Voor deze hoeveelheden is 3,2 PJ waterstof nodig, waarvan ten minste 2,1 PJ hernieuwbaar moet zijn (namelijk voor de productie van e-SAF; de raffinage van bio-SAF vereist volgens huidige wetgeving nog geen hernieuwbare waterstof). Dit vereist tussen 0,9 en 1,3 TWh additioneel opgewekte hernieuwbare elektriciteit, wat overeenkomt met een opwekkingscapaciteit van 0,2 GW tot 0,4 GW.
- Om aan de ambities van de Luchtvaartnota te voldoen moet de totale hoeveelheid SAF in 2030 ongeveer 25 PJ bedragen. De vraag naar waterstof voor raffinage van SAF zal dan moeten toenemen naar in totaal 5,5 PJ in 2030. Hiervoor is tussen 0,9 TWh en 2,3 TWh aan additionele hernieuwbare elektriciteit nodig om deze hoeveelheden waterstof te produceren. Dit komt overeen met een additionele opwekkingscapaciteit van 0,2 GW tot 0,6 GW. (let op: omdat de Luchtvaartnota geen separaat subdoel stelt voor e-SAF leidt dat tot een relatief lagere vraag naar hernieuwbare elektriciteit voor de productie van waterstof)
- Aangezien alternatieve aandrijflijnen (d.w.z. met waterstof aangedreven of batterij-elektrische vliegtuigen) in onze analyses pas vanaf 2030 een rol gaan spelen, hebben deze opties voor 2030 geen invloed op het totaalbeeld.
- In het scenario met een grote rol voor waterstofvliegtuigen, neemt de kerosinevraag volgens onze analyses af met maximaal 52 PJ in 2050 in Nederland. Dit betekent dat er in het scenario met een hoog aandeel alternatieve aandrijving in totaal minder SAF nodig om fossiele kerosine te vervangen. Tegelijkertijd is er 32 PJ additionele waterstof nodig voor toepassing in waterstofvliegtuigen.
- De Luchtvaartnota streeft naar 100% SAF in 2050. Afhankelijk van de mate waarin alternatieve aandrijflijnen een aandeel verwerven in de markt ligt de totale SAF-vraag tussen 123 en 175 PJ. Hiervoor is in 2050 tussen 82 en 102 PJ waterstof nodig, waarvan ten minste tussen 82 en 90 PJ hernieuwbaar moet zijn. Hiervoor is tussen 35 en 43 TWh aan hernieuwbare elektriciteit nodig. Dat vraagt om een opwekkingscapaciteit van 9,3 tot 11,6 GW.
- ReFuelEU Aviation stelt als doel een aandeel van 63% SAF in 2050. De totale SAF-vraag voor ReFuelEU Aviation in Nederland in 2050 ligt in onze twee scenario's tussen 78 en 110 PJ, waarvan tussen 35 en 49 PJ e-SAF moet zijn. Voor deze volumes zijn tussen 82 en 96 PJ waterstof nodig, waarvan ten minste tussen 56 en 82 PJ hernieuwbaar moet zijn. Hiervoor is tussen 24 en 39 TWh aan hernieuwbare elektriciteit nodig. Dat vraagt om een opwekkingscapaciteit van 6,5 tot 10,5 GW.

³⁷ In dit rapport gebruiken we de termen SAF, e-SAF en bio-SAF voor de duurzame, kerosine-achtige brandstoffen. Zie verder voetnoot 1.

De aangekondigde SAF-productie in Nederland is voldoende om tot en met de periode van 2045-2049 aan ReFuelEU Aviation bio-SAF-mandaten te voldoen

- De aangekondigde SAF-productie in Nederland zal naar verwachting ongeveer 81 PJ bedragen in 2030, waarvan 2,2 PJ e-SAF. Om deze SAF-volumes te produceren is 14,5 PJ waterstof nodig, waarvan ten minste 3,7 PJ hernieuwbaar moet zijn.
- De aangekondigde SAF-productiefaciliteiten in Nederland leveren in theorie genoeg volumes op om tot en met 2049 te voldoen aan de ReFuelEU Aviation-mandaten voor bio-SAF in Nederland. De e-SAF productie daarentegen zal wel vanaf 2035 moeten worden opgeschaald om aan de mandaten te voldoen. Een kanttekening hierbij is dat de productie van SAF in Nederland niet het verbruik ervan op Nederlandse luchthavens garandeert. In Nederland produceren partijen meer bio-SAF dan voor het Nederlandse aandeel nodig is. De overproductie van bio-SAF tot en met 2049 is een indicatie dat de SAF-producenten in Nederland ook gericht zijn op de exportmarkt.
- Zolang de Luchtvaartnota of de ReFuelEU Aviation niet zijn omgezet in juridisch bindende nationale wetgeving, is er een gebrek aan stimulansen voor SAF-producenten in Nederland om SAF te leveren aan de Nederlandse luchtvaartsector. Buurlanden beschikken al over SAF-mandaten en kunnen daarom afnameovereenkomsten met SAF-producenten in Nederland vastleggen.

Nederland kan de waterstofvraag voor de raffinage van SAF beïnvloeden met het ondersteunen van de waterstof-efficiënte bioconversiepaden

- Gebleken is dat in het conversieproces voor de productie van bio-SAF aanzienlijk minder additioneel waterstof nodig is dan in het syntheseproces van e-SAF. Het bio-Fischer-Tropsch-proces, bijvoorbeeld, vereist geen extra waterstof voor raffinage, aangezien de waterstof die al in de biomassa zit voldoende is. Dit kan van belang zijn in situaties waar beschikbaarheid van hernieuwbare waterstof beperkt is.
- Opstellen van meer bio-Fischer-Tropsch installaties voor bio-SAF vermindert de additionele vraag naar hernieuwbaar waterstof en kan tot 2 GW additionele opwekkingscapaciteit van hernieuwbare elektriciteit uitsparen.

Tabel 11. Samenvatting van de resultaten van deze studie. De resultaten geven we weer in petajoule (PJ) voor de vereiste hoeveelheden duurzame vliegtuigbrandstof (SAF), waarvan een deel biobrandstof (bio-SAF) en een ander deel e-brandstof (e-SAF) is; voor de totale waterstofvraag voor de raffinage van SAF en waterstofvliegtuigen, en de minimale vraag naar hernieuwbare waterstof. De vereiste opwekkingscapaciteit voor hernieuwbare elektriciteit ramen we op basis van offshore windenergie (in GW), de ene keer voor het geval dat alle waterstof hernieuwbaar moet zijn, en de andere keer alleen voor de minimaal vereiste hernieuwbare waterstof.

	2030			2050	
	ReFuelEU Aviation	Luchtvaartnota	Aangekondigde productie	ReFuelEU Aviation	Luchtvaartnota
Totale vraag naar SAF in Nederland [PJ]	8,9	25	81	78 – 110	123 – 175
Waarvan bio-SAF [PJ]	7,6	23,7	78,9	43 – 61	78 – 126
Waarvan e-SAF [PJ]	1,3	1,3	2,2	35 – 49	35 – 49
Vraag naar waterstof (fossiel en hernieuwbaar) [PJ]	3,2	5,4	14,5	91 – 96	100 – 102
Waarvan hernieuwbare waterstof [PJ]	2,1	2,1	3,7	82 – 90	82 – 90
Vraag naar additionele opwekkingscapaciteit voor hernieuwbare elektriciteit, als alle waterstof hernieuwbaar moet zijn [GW]	0,4	0,6	1,6	10,3 – 10,8	11,3 – 11,6
Waarvan een "ten minste" aandeel additionele opwekkingscapaciteit voor hernieuwbare elektriciteit [GW]	0,2	0,2	0,4	9,3 – 10,2	9,3 – 10,2

6.2 Beleidsaanbevelingen

Op basis van deze inzichten geeft studio Gear Up de volgende beleidsaanbevelingen voor Nederland:

- Voor de korte en middellange termijn vervangt het gebruik van duurzame vliegtuigbrandstof (SAF) in Nederland inzet van fossiele kerosine en daarmee is SAF voor deze periode de belangrijkste maatregel om de klimaatimpact in deze sector te verminderen.
- Tegelijkertijd is er innovatiebudget nodig om waterstof en batterij-elektrische vliegtuigtechnologie te stimuleren die het luchtvervoer energie-efficiënter maakt en de impact op andere ongewenste effecten verlaagt.
- Er zijn verdere ontwikkelingen nodig om de efficiëntie van waterstofvliegtuigen en batterij-elektrische vliegtuigen te verbeteren en hun introductie te stimuleren. Ook het effect van waterdampemissies van waterstofvliegtuigen op de opwarming van de aarde moet goed in kaart worden gebracht.
- Beleidsmakers zouden met marktspelers kunnen verkennen hoe het aandeel van SAF te verhogen om daarmee de binnenlandse SAF-productie te benutten en verder te stimuleren. Vrijwillige afspraken kunnen verder bijdragen tot het veiligstellen van hernieuwbare brandstofvolumes voor verbruik in Nederland.
- Zodra de SAF-mandaten zijn vastgesteld, maken zij de vermenigvuldigingsfactor voor de opt-in van de luchtvaart in het HBE-systeem overbodig. Daarom raden we beleidsmakers aan de vermenigvuldigingsfactor van 1,2 in de luchtvaart te schrappen zodra de SAF-mandaten van kracht zijn.
- Ter voorbereiding op de groeiende SAF-mandaten, zowel die voor e-SAF en voor bio-SAF, in ReFuelEU Aviation adviseren wij de overheid om een strategie te ontwikkelen voor de omvang van de gewenste binnenlandse SAF-productie. De binnenlandse productie van e-

SAF vereist grote investeringen in opbouw van elektrolyse-capaciteit en additionele productiecapaciteit voor hernieuwbare elektriciteitsopwekking, of van import van groene waterstof. Ontwikkeling van routes naar bio-SAF, naast HEFA, zoals Alcohol-to-Jet en bio-FT vraagt om het ontwikkelen van betrouwbare en duurzame aanvoerlijnen van biogene grondstoffen en dat vraagt om gerichte beleidsondersteuning.

Bijlage 1 – energievraag in de luchtvaartsector

Tabel 12. De energievraag van de luchtvaartsector in Nederland, zoals geprojecteerd door het EU Reference Scenario 2020. Deze projecties bleken binnen de door het PBL in hun Klimaat- en Energieverkenning 2021 gestelde bandbreedte te vallen. De passagiersvraag werd afgeleid door de energievraag van een bepaald jaar te delen door de efficiëntie van het straalvliegtuig in dat jaar. Dit komt omdat het EU Reference Scenario 2020 niet uitgaat van alternatieve aandrijflijnen om de vloot binnen te komen³⁸.

	Eenheid	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Energievraag luchtvaart in Nederland	[PJ]	80	171	179	175	174	174	175
Afgeleide vraag naar personenvervoer in de luchtvaart in Nederland	[Gpkm]	78	168	179	178	180	182	186

Energievraag per aandrijving-scenario

Tabel 13. Energievraag (totaal en per energiedrager) onder het scenario met laag aandeel alternatieve aandrijving.

	Eenheid	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Totale energievraag luchtvaart in Nederland	[PJ]	80	171	179	175	174	174	175
waarvan kerosine	[PJ]	80	171	179	175	174	174	175
waarvan waterstof	[PJ]	0	0	0	0	0	0	0
waarvan elektriciteit	[PJ]	0	0	0	0	0	0	0

Tabel 14. Energievraag (totaal en per energiedrager) onder het scenario met hoog aandeel alternatieve aandrijving.

	Eenheid	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Totale energievraag luchtvaart in Nederland	[PJ]	80	171	179	175	170	166	158
waarvan kerosine	[PJ]	80	171	179	175	163	148	123
waarvan waterstof	[PJ]	0	0	0	0	8	16	32
waarvan elektriciteit	[PJ]	0	0	0	0	0	2	3

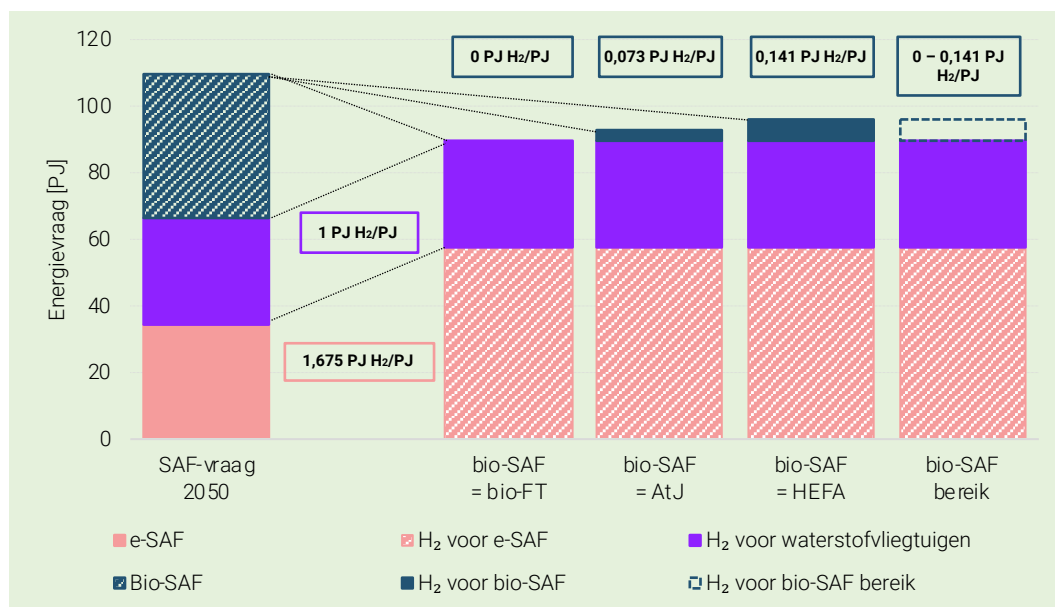
³⁸ Zoals te zien is in de "Sustainable and Smart Mobility Strategy" (Europese Commissie, 2020) die ook gebaseerd is op dezelfde PRIMES-TREMOVE model van E3-Modelling.

Bijlage 2 – berekeningen voor waterstofbehoefte bij bio-SAF

Met onze vlootprognoses en de SAF-mandaten van ReFuelEU Aviation en de Luchtvaartnota kunnen we de SAF-vraag en de waterstofvraag van waterstofvliegtuigen voor een bepaald jaar berekenen. In de linkerbalk van Figuur 20 hieronder is de SAF-vraag en de waterstofvraag van waterstofvliegtuigen voor 2050 als voorbeeld gegeven, in dit geval voor de context van ReFuelEU Aviation en het scenario met een hoog aandeel alternatieve aandrijflijnen).

De behoefte van waterstof voor waterstofvliegtuigen en voor de productie van e-SAF (op basis van e-Fischer-Tropsch) is eenvoudig vast te stellen, omdat dit vaste verhoudingen zijn. In veel van de figuren die in dit rapport gepresenteerd zijn, is te zien dat er een variabele hoeveelheid waterstof nodig is voor de productie van bio-SAF. Deze is namelijk afhankelijk van het productieproces. Tabel 9 geeft deze verschillende waterstofbehoeftes weer. Voor de precieze waterstofbehoefte die nodig is voor de productie van bio-SAF, zouden we het exacte aandeel moeten kennen van de technologieën die worden gebruikt om biokerosine te produceren. Bio-SAF kan namelijk worden geproduceerd via onder andere bio-Fischer-Tropsch (bio-FT), Alcohol-to-Jet (AtJ) of Hydrotreated Esters and Fatty Acids (HEFA). Het is niet mogelijk om dat voor de toekomstige periode in te schatten. Daarom hebben we een breedte opgenomen met een indicatie van de minimale en maximale waterstofbehoefte voor de productie van bio-SAF.

De vier rechterbalken van Figuur 20 laten zien hoe we tot de bepaling van de bandbreedte zijn gekomen, zoals die in alle grafieken is opgenomen. De linkse drie balken geven de waterstofvraag voor achtereenvolgens bio-SAF via het Fischer-Tropsch proces, via de Alcohol-to-Jet route en de HEFA-route. De rechterbalk geeft vervolgens de resulterende bandbreedte met minimum en maximum waarde. In de grafieken is steeds deze laatste resulterende waarde opgenomen, zodat er geen uitspraak wordt gedaan over welke productieroute voor bio-SAF dominant zal zijn.



Figuur 20. Toelichting bij de berekende bandbreedte voor de waterstofbehoefte op basis van de verschillende conversieroutes voor de productie van bio-SAF. De specifieke waterstofbehoefte (in PJ H₂/PJ) is ontleend aan Tabel 9.



Copyright studio Gear Up B.V. 2022

www.studiogearup.com