



Knelpuntenanalyse
vraag en aanbod
duurzame energiedragers
voor de luchtvaart

Eindrapport – 20 December 2024

Opmerking vooraf

Disclaimer

- *Dit document is de uitwerking van de vraag van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) aan Deloitte en To70 om een analyse te maken van de beschikbaarheid van duurzame energiedragers (en de grondstoffen daarvoor) voor de luchtvaart in Nederland tussen nu en 2050.*
- *Bij het opstellen van ons rapport hebben wij, conform de reikwijdte van onze werkzaamheden zoals overeengekomen in de opdrachtbevestiging, onder andere gebruik gemaakt van informatie die wij hebben verkregen via (gesprekken met) het ministerie van IenW en uit openbare bronnen. Bij de informatievergaring heeft Deloitte vertrouwd op de juistheid en volledigheid van alle informatie die ons door of namens het ministerie van IenW ter beschikking is gesteld en de informatie die openbaar verkrijgbaar is. Deloitte accepteert geen verantwoordelijkheid met betrekking tot de juistheid en volledigheid van de aangeleverde en uit openbare bronnen verkregen informatie.*
- *Dit rapport is gebaseerd op de laatste bekende informatie verkregen t/m 18 oktober 2024.*
- *Wij accepteren geen verantwoordelijkheid voor de interpretatie van de resultaten van de analyse, en de eventuele resulterende beleidskeuzes.*
- *Dit rapport mag in geen geval openbaar worden gemaakt zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Deloitte. Deloitte neemt geen verantwoordelijkheid wanneer dit rapport wordt gedeeld met derde partijen. Geen enkele partij heeft het recht om te vertrouwen op het rapport voor welk doel dan ook en wij aanvaarden geen enkele plicht, verantwoordelijkheid of aansprakelijkheid voor de inhoud ervan jegens welke partij dan ook.*

Inhoudsopgave

Knelpuntenanalyse vraag en aanbod duurzame energiedragers voor de luchtvaart

Leeswijzer	Inhoudsopgave
In deze studie is de beschikbaarheid van duurzame energiedragers (en de grondstoffen daarvoor) voor de luchtvaart in Nederland tussen nu en 2050 geanalyseerd. Dit aanbod is vergeleken met de verwachte vraag naar duurzame energiedragers van uit Nederland vertrekkende vluchten op basis van de ReFuel EU verplichtingen. Omdat de mate waarin de grondstoffen en energiedragers beschikbaar komen voor de Nederlandse luchtvaart onzeker is, wordt hier gebruik gemaakt van twee scenario's. Aan de hand van de vraag/aanbod analyse zijn knelpunten geïdentificeerd voor de beschikbaarheid van de energiedragers. In het eerste hoofdstuk worden deze knelpunten geïdentificeerd en nader beschreven.	Knelpunten p5 1. Beperkte toepassing nieuwe aandrijftechnologie 2. Afhankelijkheid van leveranciers buiten Europa 3. Concurrentievermogen van Nederlandse productie 4. Benodigde opschaling van productiecapaciteit
De studie is een brede kwantitatieve analyse en geeft een eerste inzicht in de genoemde knelpunten. Op basis daarvan kunnen we in het tweede hoofdstuk enkele conclusies trekken en doen we aanbevelingen voor vervolgonderzoek.	Conclusies, aanbevelingen en reflecties p16
Als onderdeel van deze studie is een Excel model ontwikkeld. Dit model is beschikbaar voor het analyseren van alle benodigde scenario's om antwoord te geven op de vervolgvragen. Door de complexe samenhang van verschillende brandstoffen en markten is het voor iedere beleidsvraag belangrijk de specifieke dynamiek goed te begrijpen op basis van verschillende doorrekeningen. Het laatste hoofdstuk van dit rapport ligt de aannames en werking van het model nader toe	Gebruikte methodiek p19 • Onderzoeksvraag en opzet • Uitgangspunten voor het bepalen van vraag en aanbod • Toelichting bij hoog en laag scenario • Methodiek voor invullen vraag op basis van aanbod

Overzicht knelpunten

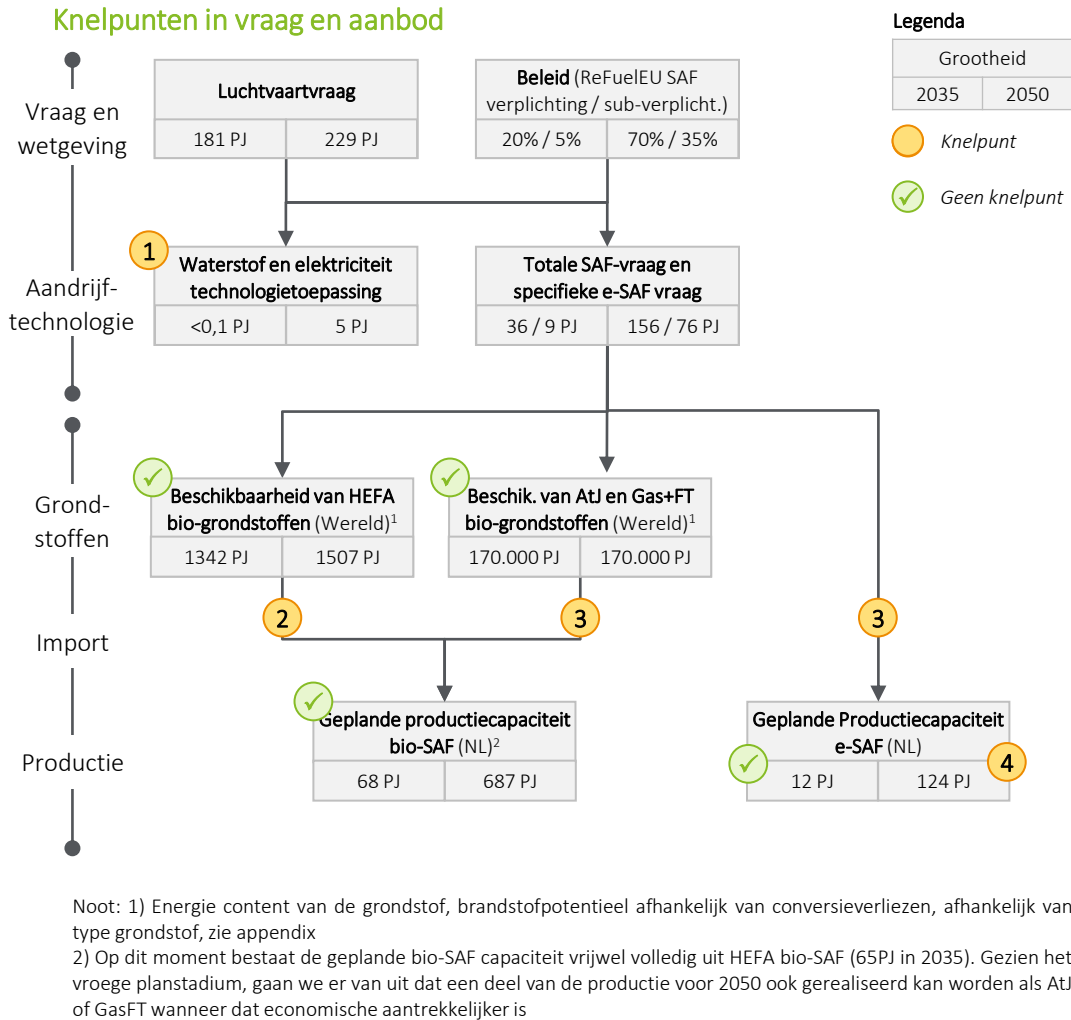
Vier knelpunten kunnen er voor zorgen dat de verwachte vraag naar duurzame energiedragers niet ingevuld kan worden; het grootste knelpunt is de afhankelijkheid van import van buiten de EU

Belangrijkste resultaten in balans vraag en aanbod

- De vraag naar duurzame brandstoffen (SAF) voor de luchtvaart wordt in grote mate bepaald door de afnameverplichtingen zoals opgelegd in RefuelEU.
- De mogelijkheid om aan de vraag naar SAF te voldoen is afhankelijk van de mogelijke inzet van **aandrijftechnologieën**, beschikbaarheid van **grondstoffen**, de mogelijkheid van **import** en beschikbare **productiecapaciteit**. Zie het schema hiernaast.
- Wereldwijd is er theoretisch **voldoende beschikbaarheid** van **grondstoffen** voor de Nederlandse vraag in 2035 en 2050. Als **plannen voor productie** van SAF in Nederland doorgaan is er bovendien voldoende SAF om aan de Nederlandse vraag in 2035 en de EU wetgeving te voldoen.
- Er zijn echter **vier knelpunten** waardoor Nederland in de periode tot 2050 mogelijk toch niet aan de vraag en/of verplichtingen kan voldoen.

Knelpunten

- Aandrijftechnologie:** Gebruik van elektriciteit en waterstof als energiedrager blijven beperkt door het verwachte bereik en capaciteit van toekomstige elektrische en waterstof-aangedreven vliegtuigen.
- Strategische autonomie:** Hoewel de strategische autonomie toeneemt door gebruik van duurzame energiedragers blijft Nederland afhankelijk van import van grondstoffen (bijv., Used Cooking Oil (UCO), andere afvalstromen), halffabricaten of eindproducten en daarmee van producerende landen buiten Europa.
- Competitiviteit:** Nederlandse productie van e-SAF is mogelijk alleen competitief op basis van halffabricaten, productie van bio-SAF op basis van buitenlands (landbouw)afval heeft het nadeel van transportkosten door substantieel lagere energiedichtheid van afval ten opzichte van bio-SAF.
- Opschaling van productiecapaciteit:** De in 2050 benodigde consumptie van e-SAF vergt grote tot zeer grote opschaling van productiecapaciteit (inclusief productie van de benodigde waterstof en elektriciteit).



1 Knelpunt: beperkte toepassing nieuwe aandrijftechnologie [1/2]

Gebruik van elektriciteit en waterstof als energiedrager blijft naar verwachting beperkt door het verwachte bereik en capaciteit van toekomstige elektrische en waterstof-aangedreven vliegtuigen

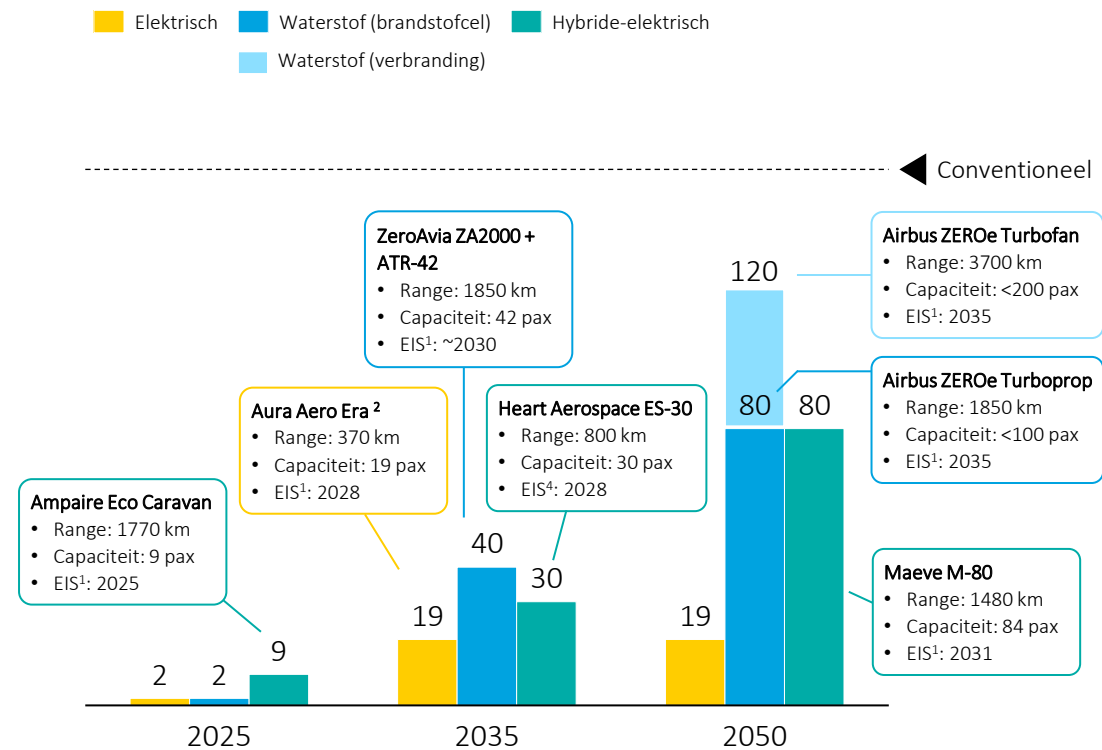
Beschrijving

- Elektrische, waterstof-aangedreven en hybride-elektrische vliegtuigen zullen zich de komende decennia verder ontwikkelen, maar inzet van deze vliegtuigen blijft beperkt door de relatief **lage capaciteit** en **beperkte actieradius**.
- Op basis van de huidige aangekondigde vliegtuigen wordt verwacht dat elektrisch vliegen pas vanaf 2035 **commercieel toegepast** zal worden, en dat dit beperkt zal zijn tot vliegtuigen met lage capaciteit (maximaal 19 passagiers) en voor korte vluchten (<500km).
- De eerste **waterstofvliegtuigen** (~40 passagiers) worden verwacht in 2035 voor vluchten tot 800 km; na 2035 worden grotere waterstofvliegtuigen (~80 passagiers) voor afstanden tot 2000 km verwacht.
- De verwachting is dat de eerste **hybride-elektrische** ('hybride') vliegtuigen (~30 passagiers) vanaf ~2030 commercieel in gebruik genomen zullen worden voor afstanden tot 800 km, en dat middelgrote hybride vliegtuigen (80 passagiers) mogelijk in gebruik zijn in 2050.

Impact

- Omdat vliegtuigen met een nieuwe aandrijftechnologie een beperkte capaciteit en bereik hebben, is hun aandeel in het aantal stoelkilometers en **energieconsumptie beperkt** (<5%).
- Vliegtuigen met een alternatieve aandrijftechnologie hebben ook **andere positieve kenmerken**, zoals lagere geluidsproductie en minder uitstoot van bv. fijnstof en stikstofoxiden. Daarmee zullen ze een significant positieve impact hebben op luchthavens en hun omgeving.

Aandrijftechnologie ontwikkeling uitgedrukt in capaciteit (aantal stoelen)



Noten: 1) Entry-into-service (EIS): door leverancier verwacht tijdstip waarop het vliegtuigtype commercieel in gebruik genomen wordt, we gaan uit van vertraging (~5jr) op basis van doorlooptijden certificering etc. ; 2) Aura Aero Era is aangekondigd als elektrisch vliegtuig; alhoewel het een hybride element bevat wordt dit type als archetype elektrisch vliegtuig gebruikt in een positieve ontwikkelingsrichting

1 Knelpunt: beperkte toepassing nieuwe aandrijftechnologie [2/2]

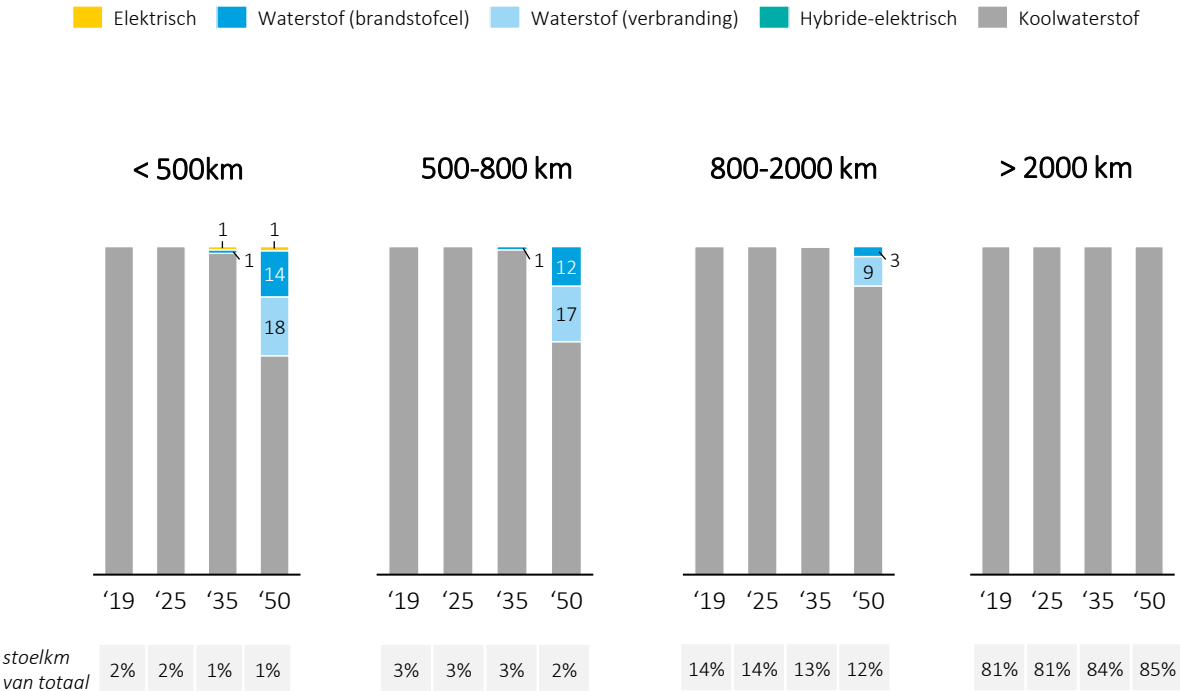
Gebruik van elektriciteit en waterstof als energiedrager blijft naar verwachting beperkt door het verwachte bereik en capaciteit van toekomstige elektrische en waterstof-aangedreven vliegtuigen

Onzekerheden

- De inschatting van de toepassing van elektrische, waterstof-aangedreven en hybride vliegtuigen is in deze studie gebaseerd op de aanname dat vluchten bediend zullen worden door **vliegtuigen met een zelfde capaciteit** (op basis van 2019 vluchtdata). Het kan ook zo zijn dat een vlucht die momenteel bediend wordt met een conventioneel vliegtuig met een capaciteit van 200 passagiers in de toekomst bediend zal worden met twee vluchten met een waterstofvliegtuig van 100 passagiers. Dit zou een veel grotere toepassing van waterstofvliegtuigen mogelijk maken.
- Er is uiteraard onzekerheid in de **ontwikkeling van technologie**. De inschatting in onze analyse is op basis van huidige aangekondigde vliegtuigconcepten en expertise van Deloitte en To70, maar ontwikkeling kan mee- of tegenvallen. Echter, energieconsumptie wordt met name bepaald door de consumptie op lange afstandsvluchten, en de kans dat waterstofvliegtuigen in 2050 op grote schaal commercieel ingezet worden voor intercontinentale vluchten (>200 passagiers, >2000km) is verwaarloosbaar.
- In de **periode 2050-2070** komt hier mogelijk verandering in en kan het aandeel waterstof groeien in de energiemix. Als waterstofvliegtuigen zich verder ontwikkelen en de capaciteit van een typisch vliegtuig van 120 naar 200 passagiers groeit (waarvan nu geen signalen zijn), kan meer dan 95% van de luchtvaart (in stoelkm) onder 2000 km (intra-europees) bediend worden (bij gelijke range als in 2050). Daarnaast kan dan 10% van de vluchten boven de 2000 km op waterstof worden gevlogen. Samen is dit ongeveer 20% van de stoelkilometers. Het ligt niet in lijn der verwachting dat zowel capaciteit als bereik van waterstofvliegtuigen zich zodanig ontwikkelen dat ze op alle vluchten kunnen worden ingezet.

Noot: 1) Zie appendix voor detail aannames

Mogelijke toepassing per afstandscategorie (% van # stoelkm)¹



2 Knelpunt: afhankelijkheid van leveranciers buiten Europa [1/3]

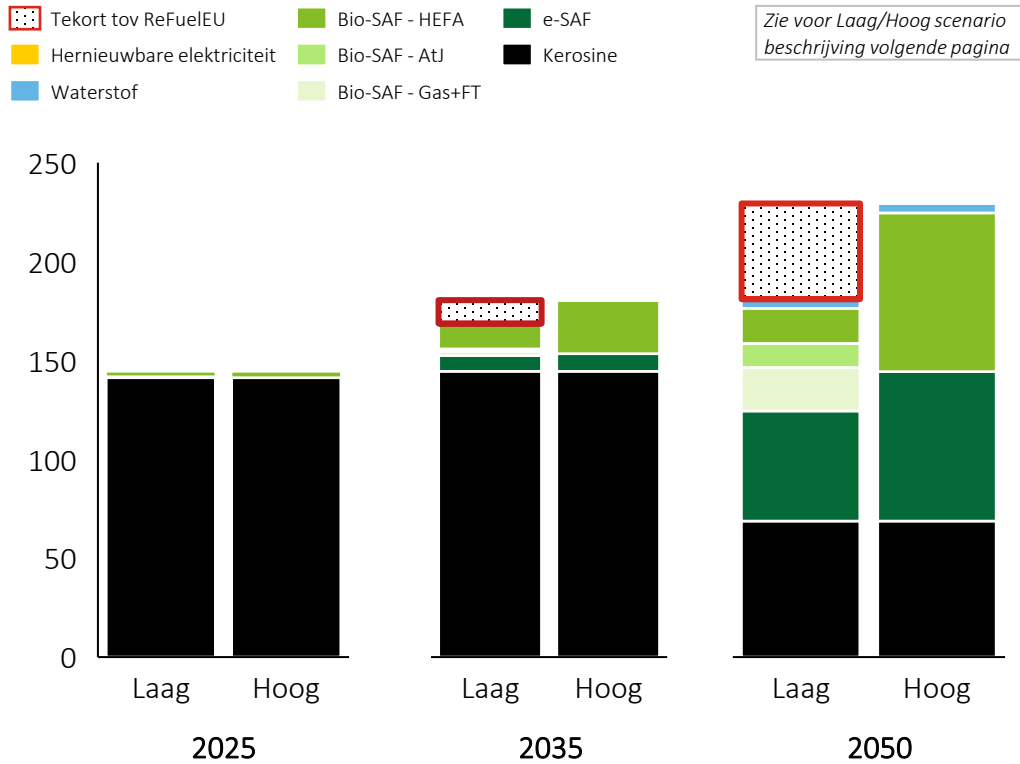
Nederland blijft grotendeels afhankelijk van import van grondstoffen (UCO, afvalstromen), halffabricaten of eindproducten en daarmee van landen buiten Europa

Beschrijving

- We gaan er van uit dat de vraag naar energiedragers op de **economisch meest efficiënte wijze** wordt ingevuld. Daarbij wordt steeds de goedkoopste energiedrager ingezet, voor zover beschikbaar. Daarna de op een na goedkoopste, en zo verder tot aan de vraag is voldaan. Dit resulteert in een mogelijke energiemix zoals te zien in de figuur hiernaast. Waarbij we onderscheid maken tussen een scenario van laag aanbod en een van hoog aanbod om de bandbreedte van mogelijke invulling te laten zien (zie p24).
- Bio-SAF op basis van HEFA** is de goedkoopste duurzame energiedrager en zal daarom een belangrijk onderdeel zijn van de energiemix in de toekomst. Het HEFA proces verwerkt afvalvetten (e.g. frituurvet, dierlijk vet) tot bio-SAF. In Nederland is voldoende productiecapaciteit gepland, maar voor de beschikbaarheid van de afvalvetten zijn we afhankelijk van het buitenland.
- Bij onvoldoende beschikbaarheid van HEFA bio-SAF, worden duurdere productiemethoden interessant. Alcohol-to-Jet (AtJ) en Gasification + Fischer-Tropsch (Gas+FT) zetten respectievelijk ethanol en methaan uit bijvoorbeeld landbouwafval of huiscompost om in **AtJ GasFT bio-SAF**. De productiecapaciteit hiervan in Europa is nog beperkt, ook omdat er op dit moment nog geen vraag naar is.
- De duurzame energiedrager met de hoogste productiekosten is **e-SAF**. E-SAF wordt gemaakt door een bron van koolstof te combineren met waterstof. Deze koolstof kan komen uit geconcentreerde CO₂ emissies (uit de industrie van fossiele oorsprong of van biologische oorsprong) of kan direct uit de lucht worden gehaald (Direct Air Capture) waarmee je niet afhankelijk bent van afvalstromen. Dit proces vergt veel energie. In ReFuelEU is een aparte afnameverplichting opgenomen voor e-SAF. De relatief hoge prijs van hernieuwbare elektriciteit in Nederland maakt dat de e-SAF verplichting in eerste instantie wordt ingevuld met geïmporteerde e-SAF of e-SAF geproduceerd uit half-fabrikaten.

Zie p25 voor inschatting van de verschillende productiekosten en onderliggende economische theorie

Resulterende energiemix (PJ)



Gebruik van NL grondstoffen (PJ)

	2025	2035	2050
Bio	~1	5 – 4	26 – 4
Waterstof	0 – 1	10 – 7	56 – 21
Elektriciteit ¹	0 – 1	16 – 12	108 – 36

Noot: 1) Gebruik van hernieuwbare elektriciteit, inclusief hernieuwbare elektriciteit voor waterstofproductie

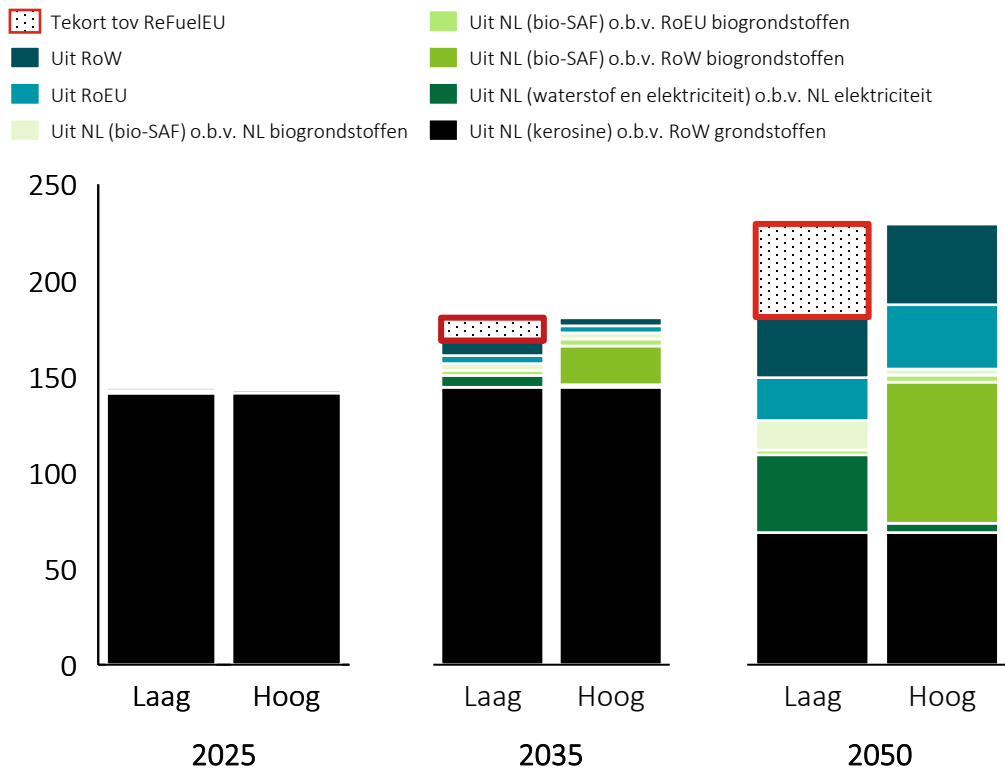
2 Knelpunt: afhankelijkheid van leveranciers buiten Europa [2/3]

De beperkte beschikbaarheid van Nederlandse bio-grondstoffen en relatief hoge prijs van duurzame elektriciteit, zorgen voor strategische afhankelijkheid van duurzame energiedragers uit andere landen

Onzekerheden

- Uit de analyse volgt dat Nederland in 2050 voor een klein deel (2-23%) **eigen grondstoffen** zal gebruiken; voor het overige deel van de luchtvaartbrandstoffen is Nederland **afhankelijk** van grondstof (UCO, ruwe olie), halffabricaat (bv. Methanol) of eindproduct (SAF)
- Deze afhankelijkheid brengt een aantal fundamentele onzekerheden met zich mee a) de **kerosineprijs ontwikkeling**, b) de **beschikbaarheid van UCO en dierlijke vetten** uit de rest van de wereld, c) de **beschikbaarheid** van energiedragers op basis van relatief nieuwe techniek en d) **prijsopdrijvende effecten**:
 - De uitkomsten zijn gebaseerd op de aanname dat er altijd goedkopere kerosine beschikbaar is vergeleken met bio-SAF of e-SAF (gezien beschikbare oliereserves o.b.v. lage productieprijs). Door prijsprikkels (bv. ETS), handelsbelemmeringen (oliecrisis) of onverwacht snelle daling van **productiekosten van SAF**, kan het zo zijn dat kerosine niet meer de meest economisch aantrekkelijke brandstof is. Dat zou betekenen dat een veel groter gedeelte van energiebehoefte met SAF wordt ingevuld en onze afhankelijkheid afneemt.
 - Het verschil tussen Hoog en Laag scenario wordt voornamelijk bepaald door de **beschikbaarheid van UCO en dierlijke vetten vanuit de rest van de wereld**. Het kantelpunt tussen de scenario's is wanneer Europa ~50% of meer van alle wereldwijd beschikbare grondstoffen kan verwerven. Krijgt Nederland hiervan zijn redelijke deel (7,5% op basis van huidig kerosineverbruik), dan kan de SAF-verplichting voor bio-SAF volledig met HEFA bio-SAF-productie worden ingevuld. Op dit moment gaat 40% van de UCO uit de rest van de wereld naar Europa, dus 50% lijkt een reëel scenario. Het is echter waarschijnlijk dat andere landen deze grondstof zelf gaan gebruiken en misschien helemaal niets meer geïmporteerd kan worden vanuit buiten de EU (laag scenario). Daarbij is het ook de vraag hoe effectief het importeren van deze afvalstoffen is in het behalen van wereldwijde emissiereductie, ze kunnen immers in de thuismarkt niet meer in bio-SAF worden omgezet.

Afhankelijkheid van import van energiedragers in de energiemix (PJ)¹



Strategische afhankelijkheid¹

Van RoEU	~0,6%	~4%	11 – 16%
Van RoW	99%	91 – 94%	65 – 80%
Onafhankelijk	~0,3%	5 - 2%	24 – 4%

Noot: 1) Afhankelijkheid van energiedragers of grondstoffen uit de rest van de EU (RoEU) en de rest van de wereld (RoW)

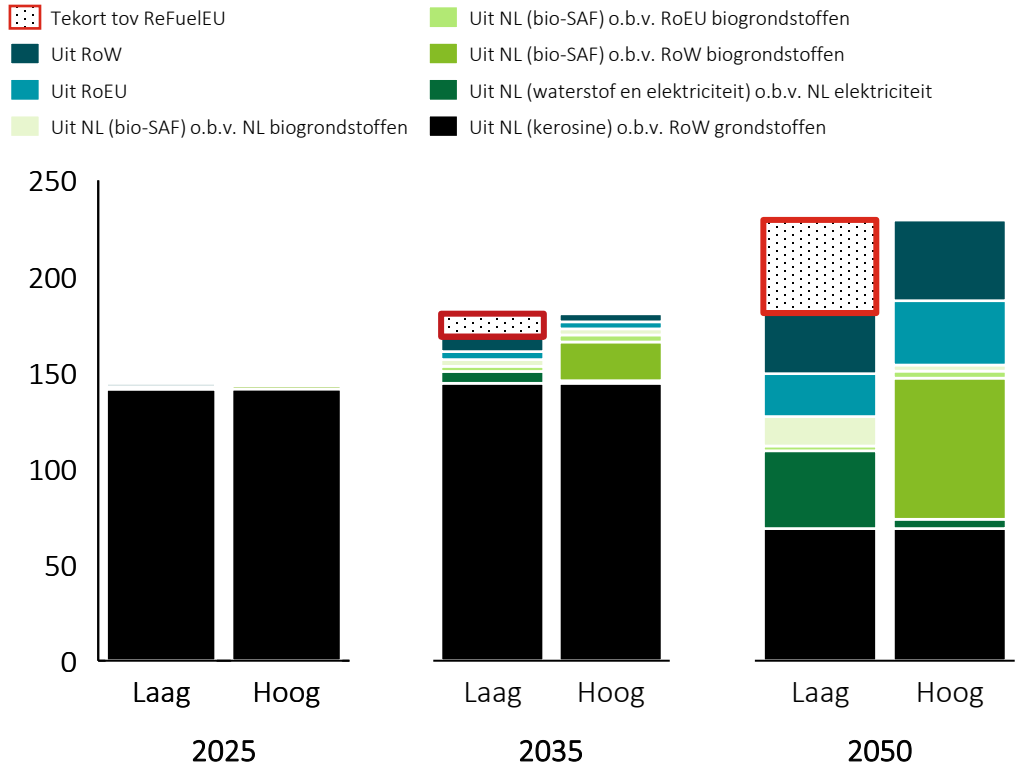
2 Knelpunt: afhankelijkheid van leveranciers buiten Europa [3/3]

De beperkte beschikbaarheid van Nederlandse bio-grondstoffen en relatief hoge prijs van duurzame elektriciteit zorgen voor strategische afhankelijkheid van duurzame energiedragers uit andere landen

Onzekerheden

- Vervolg van opsomming vorige pagina
 - Krijgt Europa **minder dan ~50%** van de UCO en dierlijke vetten, dan kan de verplichting gehaald worden door productie o.b.v. andere afvalstromen of e-SAF. Beide methoden zijn op kleine schaal bewezen, dus is het onzeker wat de productiecapaciteit in 2035 en 2050 zal zijn. We achten zowel 50% (laag) als 120% (hoog) van de bestaande plannen realistisch. Ook de handel is onzeker. Wanneer de rest van de wereld alternatieven heeft, of lagere duurzaamheids-doelstellingen, dan kan 80% (hoog) van de wereldwijde productie voor Europa bestemd zijn. Bij gelijk optrekken is 20% realistischer. Om aan de ReFuel verplichtingen te voldoen zou Europa ca. **25% van de totaal geplande bio-SAF productie** in de rest van de wereld moeten afnemen en moet Nederland ca **7% van de wereldwijde e-SAF** productie afnemen. Deze benodigde levering van SAF aan Nederland valt binnen de bandbreedtes van de lage en hoge scenario's. Het is dus onzeker of er voldoende bio-SAF en e-SAF beschikbaar zal zijn voor Nederland. Dit kan deels voorkomen worden door AtJ en GasFT productie in Nederland te stimuleren zodat er meer productiecapaciteit en grondstoffen beschikbaar zijn
 - Tot slot kan door handelsbelemmeringen een **prijsopdrijvend effect** ontstaan. Dit kan bijvoorbeeld door het heffen van exporttarieven. Daarnaast zullen ook producenten bij schaarste en afhankelijkheid de verkoopprijs net iets onder het duurdere alternatief stellen. Zo zou de verkoopprijs van afvalvetten zo gekozen kunnen worden dat het nog maar net goedkoper is om HEFA bio-SAF te maken en niet te wisselen naar een duurdere variant. E-SAF kan, bij gebrek aan concurrentie, worden verkocht tegen een prijs die net onder de productiekosten in Nederland ligt. Door deze dynamiek is volledige afhankelijkheid van de bron met laagste productiekosten duurder dan een combinatie van eigen productie en verschillende importstromen.

Afhankelijkheid van import van energiedragers in de energiemix (PJ)¹



Strategische afhankelijkheid¹

Van RoEU	~0,6%	~4%	11 – 16%
Van RoW	99%	91 – 94%	65 – 80%
Onafhankelijk	~0,3%	5 - 2%	24 – 4%

Noot: 1) Afhankelijkheid van energiedragers of grondstoffen uit de rest van de EU (RoEU) en de rest van de wereld (RoW)

3 Knelpunt: concurrentievermogen van Nederlandse productie [1/2]

Nederlandse productie van e-SAF en bio-SAF op basis van buitenlands (landbouw)afval is waarschijnlijk alleen competitief op basis van halffabricaten

Beschrijving

- Nederland heeft een **sterk petrochemisch cluster** rondom belangrijke zeehavens en is momenteel een **belangrijke producent van kerosine**. Het zou deze positie (kunnen) gebruiken om ook SAF te produceren. Echter, wat betreft de concurrentiepositie van Nederland voor de productie van SAF zien wij twee aandachtspunten: voor bio-SAF de beschikbaarheid van bio-grondstoffen en voor e-SAF de mogelijk duurdere productiekosten ten opzichte van het buitenland.
- Bij beperkte beschikbaarheid van grondstoffen voor AtJ en Gas+FT bio-SAF in Nederland (~50PJ in laag scenario), zullen Nederlandse producenten van bio-SAF waarschijnlijk een significant gedeelte van de **benodigde energie moeten importeren, ofwel als grondstof ofwel als halffabricaat** (bijv. bio-methanol of bio-ethanol). Gezien de lage energiedichtheid van bio-grondstoffen zoals landbouwafval zullen transportkosten relatief hoog zijn ten opzichte van transport van halffabricaat of bio-SAF zelf: voor dezelfde hoeveelheid energie moet ~5x zoveel grondstof worden vervoerd¹. Het lijkt daarom waarschijnlijk dat (bio-)SAF deels op basis van geïmporteerde halffabricaten geproduceerd zal worden.
- We verwachten dat **Nederlandse e-SAF productie op basis van in Nederland geproduceerde waterstof niet competitief** zal zijn ten opzichte van buitenlandse e-SAF. Dit komt door de relatief hoge kosten van hernieuwbare elektriciteit (~€100 per MWh in NL inclusief netwerkkosten versus ~€30 per MWh in het buitenland) die ook doorwerkt in de productiekosten van op elektriciteit gebaseerde waterstof. Nederlandse productie van e-SAF zal naar verwachting **alleen competitief** zijn op basis van **halffabricaten** (bijv. e-methanol) of **waterstof per pijpleiding** vanwege de hoge kosten voor de benodigde conversie voor maritiem transport van waterstof.

Opties voor de configuratie van de waardeketen

	Waardeketen			Overweging	
	Buitenland	Transport	Nederland	Bio-SAF	E-SAF
Volledig lokale productie			 Productie van energiedrager	Onvoldoende bio-grondstoffen	Hoge elektriciteitsprijs
Import van grondstoffen	 Verkrijgen van grondstoffen	 Import van grondstoffen	 Productie van energiedrager	Hoge transportkosten van bio-grondstoffen	Elektriciteit en waterstof inefficiënt om over grote afstand te importeren
Import van halffabricaten	 Productie van halffabricaten	 Import van halffabricaten	 Productie van energiedrager	Methanol of ander halffabricaat kan geïmporteerd en lokaal verwerkt worden	
Import van energiedrager	 Productie van energiedrager	 Import van energiedrager		Verhoogt strategische afhankelijkheid en negatieve impact op verdienvermogen petrochemisch cluster Rotterdam	

Noot: 1) Op basis van bron: ICCT (2021) ‘Estimating sustainable aviation fuel feedstock availability to meet growing European Union demand’

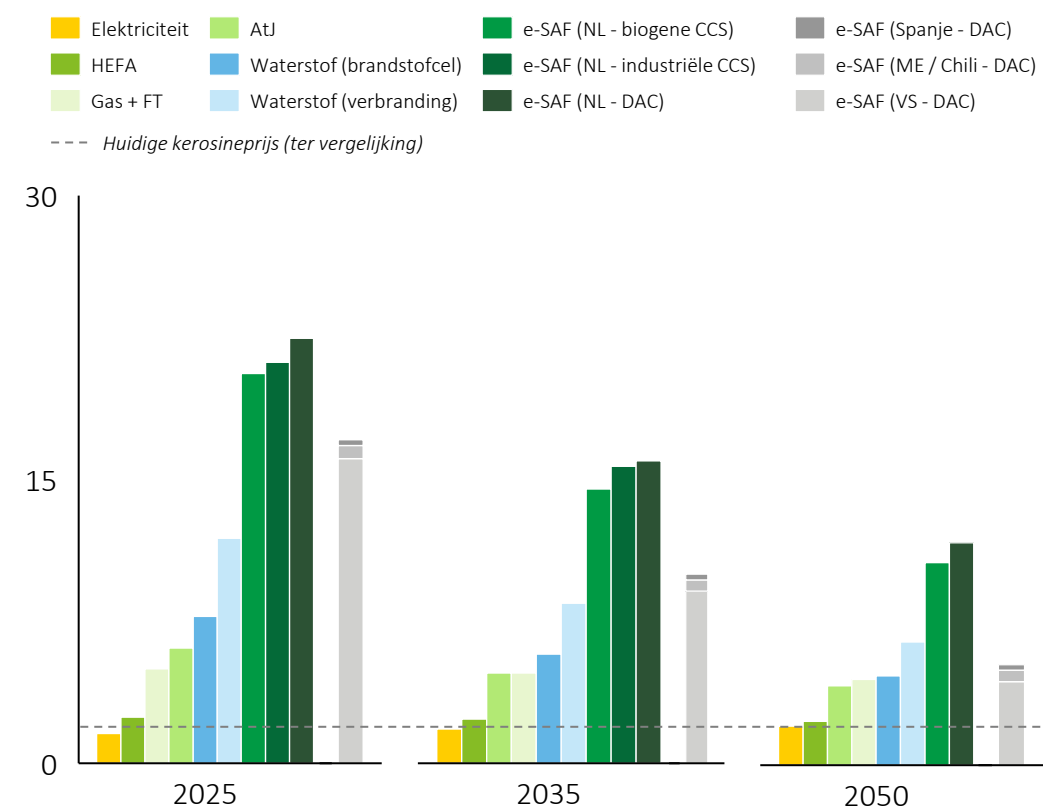
3 Knelpunt: concurrentievermogen van Nederlandse productie [2/2]

Nederlandse productie van e-SAF en bio-SAF op basis van buitenlands (landbouw)afval is waarschijnlijk alleen competitief op basis van halffabricaten

Onzekerheden

- Het is nog onzeker in welke **mate de productie van SAF via halffabricaten kan concurreren** met directe productie van SAF (in binnen- of buitenland), dit zal bijvoorbeeld afhangen van de mate van concentratie van bio-grondstoffen en goedkope hernieuwbare elektriciteit op specifieke locaties.
- De **clustereffecten** in Rotterdam worden gerealiseerd doordat veel verschillende petrochemische producten op een plaats gemaakt worden en de productielocatie goed verbonden is met alle verschillende afzetmarkten. Het is niet onderzocht of deze schaalvoordelen bereikt kunnen worden bij het grootschalig gebruik van methanol en/of ethanol als basis in de chemiesector.
- De **noodzaak tot import** van grondstoffen/halffabricaten voor AtJ/GasFT bio-SAF is er alleen wanneer HEFA bio-SAF productie onvoldoende is, de beschikbaarheid van grondstoffen in Nederland onvoldoende is en e-SAF niet prijscompetitief wordt met deze bio-SAF. Dat maakt het een onzekere markt om in te investeren.
- De **prijswontwikkeling van hernieuwbare elektriciteit** is ook onzeker. Wellicht is voor 100% hernieuwbare energie een grote overcapaciteit nodig om op alle momenten voldoende energie te kunnen leveren. Dit betekent dat op sommige andere momenten er overcapaciteit is die tegen lage kosten kan worden gebruikt voor waterstof en SAF productie.

Ontwikkeling van productiekosten (€c per stoelkm, constant prijspeil)



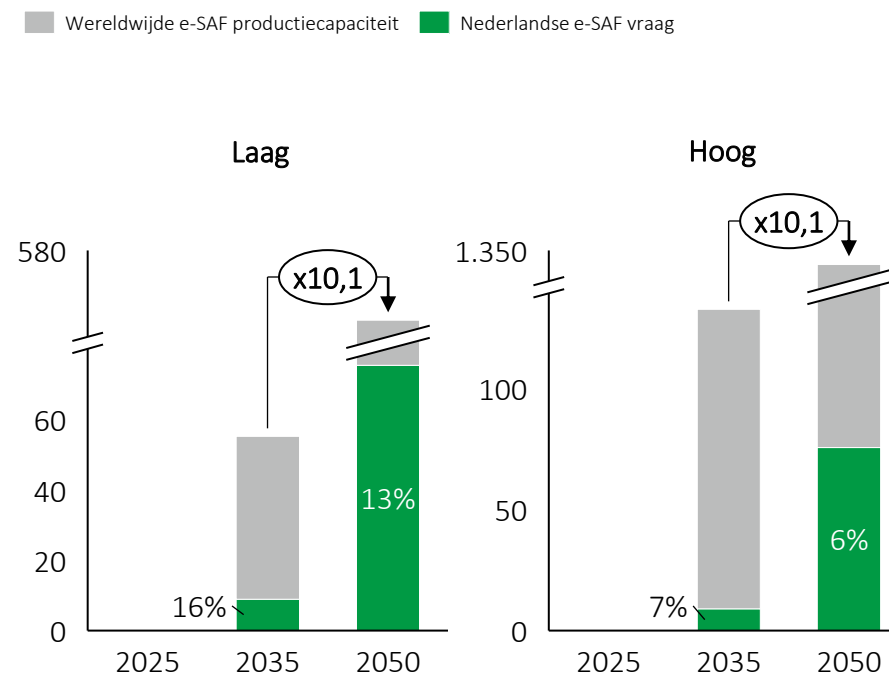
4 Knelpunt: benodigde opschaling van productiecapaciteit [1/2]

De in 2050 benodigde consumptie van e-SAF vergt grote tot zeer grote opschaling van productiecapaciteit, inclusief de benodigde waterstof en elektriciteit

Beschrijving

- De **vraag naar e-SAF** in Nederland zal groeien van ~9 PJ in 2035 tot ~76 PJ in 2050, onder invloed van de groeiende luchtvaartvraag, de groeiende verplichting vanuit de Europese wetgeving (ReFuelEU) en de in deze studie verwachte beperkte toepassing van elektrisch en waterstof-vliegen.
- Deze significante groei van de vraag naar e-SAF vergt een **opschaling van e-SAF productiecapaciteit** tussen 2035 en 2050 met een factor van **meer dan 8x** (op basis van de groei van de Nederlandse e-SAF vraag, ervan uitgaande dat het aandeel Nederlandse e-SAF consumptie van de wereldwijde productie gelijk blijft tussen 2035 en 2050).
- In deze analyse gaan we ervan uit dat een **wereldwijde opschaling** met een **factor 10x mogelijk is** tussen 2035 en 2050, ervan uitgaande dat de groei van de SAF productiecapaciteit tot aan 2035 op eenzelfde manier zal doorzetten tot aan 2050 (jaarlijkse groeifactor van ~16%). Dit lijkt een reële aanname aangezien op veel gunstige plekken voor zonne-energie ook veel ruimte beschikbaar is, denk aan Spanje, Marokko, Saudi Arabië, Chili, VS. Op basis van deze verwachting zal het aandeel van de Nederlandse e-SAF consumptie van de wereldwijd beschikbare e-SAF dalen van 7-16% naar 6-13%.

Ontwikkeling van vraag en aanbod van e-SAF in Nederland (PJ)



4 Knelpunt: benodigde opschaling van productiecapaciteit [2/2]

De in 2050 benodigde consumptie van e-SAF vergt grote tot zeer grote opschaling van productiecapaciteit, inclusief benodigde waterstof en elektriciteit

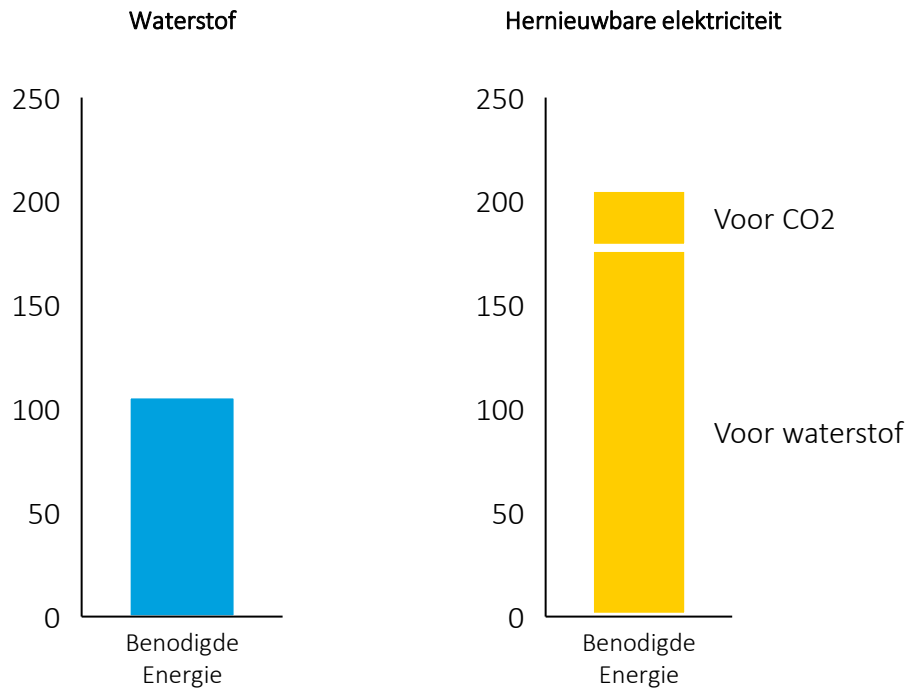
Impact

- De e-SAF consumptie in 2050 zorgt ook voor een significante vraag naar waterstof en elektriciteit. Mocht Nederland **geen e-SAF of halffabricaten kunnen of willen importeren**, dan is ~105 PJ Nederlandse waterstof en 200-210 PJ Nederlandse hernieuwbare elektriciteit (zowel voor waterstofproductie als voor de CO₂ uit CCS of DAC voor e-SAF productie) benodigd. Dit komt overeen met ~21% van de totale waterstofbeschikbaarheid en ~11% van de totale beschikbaarheid van hernieuwbare elektriciteit in Nederland in 2050.
- Deze totale benodigde hoeveelheid hernieuwbare elektriciteit legt ook een beslag op het landgebruik in Nederland en de belasting van het elektriciteitsnet (naast andere uitdagingen rondom de uitbreiding van het elektriciteitsnet). Bij volledige e-SAF productie in Nederland op basis van Nederlandse waterstof en hernieuwbare elektriciteit is in 2050 naar verwachting **~650 tot 1500 km²** landoppervlak nodig afhankelijk van de mix van windenergie en zonne-energie, dit komt overeen met 1,5% van het landoppervlak voor zon óf bijna 3% van het Nederlands Continentaal Plat voor wind-op-zee.

Onzekerheden

- De kosten voor **investeringen** zullen vele miljarden euro's bedragen en hoewel de investeringen zich kunnen terugverdienen, zal het de nodige tijd kosten om de investeringen te financieren en te realiseren. Daarnaast zijn er verscheidene andere randvoorwaardelijke factoren die mogelijk beperkend kunnen werken (zoals ontwikkeling van elektriciteitsnet, distributie-infrastructuur, vergunningverlening, voldoende technisch personeel).
- Vergelijkbare beperkingen zijn er ook bij opschaling in andere locaties op de wereld. Het daadwerkelijk realiseren van de benodigde e-SAF productiecapaciteit vraagt een grote en **langdurige inzet** van overheden en marktpartijen wereldwijd.

Benodigde waterstof en hernieuwbare elektriciteit voor e-SAF in 2050 (PJ)



Grondbeslag voor totale elektriciteitsproductie

O.b.v. zon	~650 km ²
O.b.v. wind-op-zee	~1.500 km ²

Knelpuntenanalyse vraag en aanbod duurzame energiedragers voor de luchtvaart

Knelpunten

p5

1. Beperkte toepassing nieuwe aandrijftechnologie
2. Afhankelijkheid van leveranciers buiten Europa
3. Concurrentievermogen van Nederlandse productie
4. Benodigde opschaling van productiecapaciteit

Conclusies, aanbevelingen en reflecties

p16

Gebruikte methodiek

p19

- Onderzoeksvraag en opzet
- Uitgangspunten voor het bepalen van vraag en aanbod
- Toelichting bij hoog en laag scenario
- Methodiek voor invullen vraag op basis van aanbod



Conclusies, aanbevelingen en reflecties

De conclusies van dit onderzoek vragen, na validatie en update, om een strategie met samenhangende beleidskeuzes voor de verschillende duurzame energiedragers

Belangrijkste conclusies

Op basis van de huidige inzichten zijn er **vier knelpunten** die er voor kunnen zorgen dat de verwachte vraag naar duurzame energiedragers niet ingevuld kan worden

- 1 Gebruik van elektriciteit en waterstof als energiedrager blijven naar verwachting beperkt door het verwachte bereik en capaciteit van toekomstige elektrische en waterstof-aangedreven vliegtuigen
- 2 Nederland blijft grotendeels afhankelijk van import van grondstoffen (UCO, afvalstromen), halffabricaten of eindproducten en claimt daarmee een groot deel van grondstoffen uit landen buiten Europa
- 3 Nederlandse productie van e-SAF en bio-SAF op basis van buitenlands (landbouw)afval is waarschijnlijk alleen competitief op basis van halffabricaten
- 4 De in 2050 benodigde consumptie van e-SAF vergt grote tot zeer grote opschaling van productiecapaciteit, inclusief benodigde waterstof en elektriciteit

Aanbevelingen

- **Update** de onderliggende aannames wanneer **nieuwe relevante informatie** beschikbaar komt, bijvoorbeeld wanneer de nieuwe WLO-scenario's van het PBL beschikbaar komen in 2025.
- **Toets** de uitkomsten met een **diverse groep stakeholders** (bijv., brandstofproducenten, luchthavens, luchtvaartmaatschappijen, academische wereld, kennisinstellingen) om de resultaten verder aan te scherpen.
- Maak een aantal **samenhangende beleidskeuzes** op basis van nader onderzoek:
 - Wat lijkt de meest geschikte technologie voor korte vluchten (<2000km) om de negatieve impact door geluid en lokale emissies te beperken: waterstof of batterij/SAF hybride? Hoe kan deze verder ondersteund worden?
 - Welke hoeveelheid afvalvetten (UCO/animal fats) wil Nederland tegen welke prijs importeren en verwerken tot bio-SAF? Welke handelsovereenkomsten en investeringen zijn hiervoor nodig?
 - Op welke onderdelen van AtJ en e-SAF waardeketen kan Nederland concurrerend zijn en op welke onderdelen wil Nederland investeren ten behoeve van verdienvermogen en strategische autonomie?
 - Is de economische waarde van de combinatie van AtJ en e-SAF productie groter dan alleen e-SAF dankzij productiesynergieën? Wil Nederland daarom inzetten op de ontwikkeling van AtJ?
 - Welke onderdelen van de waardeketen zijn modulair en welke kennen juist grote schaalvoordelen door synergie tussen bio-SAF en e-SAF of met andere nu petrochemische producten. Waar kan Nederland zijn clustervoordeel inzetten? Welke halffabricaten kunnen geïmporteerd worden? Met welke landen moeten we daarvoor handelsverdragen sluiten? Welke investering en overheidssteun is nodig voor de transitie van het Nederlands petrochemisch cluster?
 - In welke mate wil Nederland met wind-op-zee zelf voldoende waterstof kunnen maken om aan de SAF-vraag op Europees niveau te voldoen en niet afhankelijk te zijn van andere landen? Hoeveel overcapaciteit is wenselijk en in welke mate willen we voor waterstof en SAF-productie afhankelijk zijn over productie?

Conclusies, aanbevelingen en reflecties

Reflecties

- Hoewel er theoretisch gezien voldoende wereldwijde beschikbaarheid is aan grondstoffen t.o.v. de Nederlandse luchtvaartvraag is het zeer onzeker of deze **grondstoffen ook beschikbaar komen voor de Nederlandse luchtvaart**. In het meest ongunstige geval, in een scenario met veel handelsrestricties, **kan er een tekort ontstaan van ~20%** (zie knelpunt 2) . Dit kan een sterk prijsopdrijvend effect hebben om toch aan, de door Europese verplichtingen gecreeërde, vraag te voldoen. Dit geeft een noodzaak voor overheid en Nederlandse sector om nu te acteren.
- **HEFA - bio-SAF** productie op basis van Used Cooking Oil (UCO) is voorlopig de goedkoopste productie van bio-SAF. Tot 2035 zien we voldoende productiecapaciteit in Nederland om aan de vraag te voldoen maar hiervoor is Nederland wel afhankelijk van import van UCO. Na 2035 wordt het beslag op de wereldwijde beschikbaarheid van UCO voor de Nederlands luchtvaartvaart onevenredig groot (50% van de beschikbaarheid van buiten Europa gaat naar Europa). Daarbij is het ook de vraag hoe effectief het importeren van deze afvalstoffen is in het behalen van wereldwijde emissiereductie, ze kunnen immers in de thuismarkt niet meer in bio-SAF worden omgezet. Daarom lijkt het verstandig om uit te gaan van beperkte bio-SAF productie o.b.v. UCO.
- De **overige vraag** moet worden ingevuld door bio-SAF op basis van andere biogene afvalstromen of e-SAF. Een deel van de productie zal hiervan bij de bron van biogene afvalstromen of hernieuwbare elektriciteit gebeuren omdat half-fabrikaten of SAF makkelijker te transporteren zijn.
- Hoe de **waardeketen** zich zal configureren en of er lokale productie van SAF zal ontstaan, onafhankelijk van handelsrestricties, hangt af van de synergetische voordelen van het petrochemisch cluster in Nederland versus de kosten van de grondstoffen op verschillende productielocaties. Op basis van een eerste inschatting hiervan lijkt er een kans te zijn om half-fabrikaten (methanol) te importeren en verder te verwerken. Hoewel de grondstofkosten in Nederland hoger zullen zijn, kan Nederland altijd een klein deel productie volledig zelf in de hand houden op basis van lokale afvalstromen en groene stroom/waterstof productie in het kader van strategische autonomie.
- Voor een groot deel zal de Nederlandse luchtvaart energie-**strategisch afhankelijk** blijven van het buitenland omdat de prijs en beschikbaarheid van Nederlandse grondstoffen niet competitief zijn. Hoewel dat nu ook al het geval is voor kerosine, is dat in een zich ontwikkelende markt risico vol, zeker als die vrijwel alleen wordt gedreven door opgelegd beleid en wordt voorzien door een beperkt aantal leveranciers. Ook in dit opzicht lijkt het beter om de strategische afhankelijkheid te beperken door in te zetten op half-fabrikaten waarvoor meer leveranciers zullen zijn.
- Dit rapport bevat aanwijzingen dat vliegen op **waterstof** richting 2050 beperkte toepassing zal hebben, en daarmee beperkt zal bijdragen aan emissiereductie voor vliegen. Aanvullend onderzoek naar de competitiviteit van vliegen op waterstof met bio-SAF en e-SAF, en de bijdragen aan emissiereductie en geluidoverlast ligt voor de hand.

Knelpuntenanalyse vraag en aanbod duurzame energiedragers voor de luchtvaart

Knelpunten

p5

1. Beperkte toepassing nieuwe aandrijftechnologie
2. Afhankelijkheid van leveranciers buiten Europa
3. Concurrentievermogen van Nederlandse productie
4. Benodigde opschaling van productiecapaciteit

Conclusies, aanbevelingen en reflecties

p16

Gebruikte methodiek

p19

- Onderzoeksvraag en opzet
- Uitgangspunten voor het bepalen van vraag en aanbod
- Toelichting bij hoog en laag scenario
- Methodiek voor invullen vraag op basis van aanbod



Methodiek

Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat wil inzicht in het aanbod van en de vraag naar duurzame energiedragers, om beter begrip te krijgen over mogelijke knelpunten die de komende jaren kunnen optreden

Context

- In 2015 werd het Akkoord van Parijs ondertekend met als doel de opwarming van de aarde ruim onder de 2°C te houden en inspanningen te leveren om de temperatuurstijging te beperken tot 1,5°C. In 2020 stelde de Nederlandse regering samen met de luchtvaartsector in dat kader het Akkoord Duurzame Luchtvaart op dat de volgende afspraken bevat over de **emissiereductie** binnen de luchtvaart en het daarvoor benodigde **gebruik van duurzame energiedragers (SAF)**: 14% in 2030 en 100% in 2050.
- Daarna heeft ook de Europese Unie (EU) **doelstellingen voor luchtvaartbrandstoffen** vastgesteld: in 2025 moet luchtvaartbrandstof voor 2% uit SAF bestaan, oplopend tot 70% in 2050.
- **Uitdagingen** bij de transitie naar gebruik van duurzame energiedragers zijn, onder andere, de opschaling van productiecapaciteit voor duurzame energiedragers, beschikbaarheid van grondstoffen en technologieontwikkeling (zowel wat betreft nieuwe type vliegtuigen als voor productie van energiedragers).
- Ieder van bovenstaande uitdagingen kan leiden tot specifieke **knelpunten** bij het realiseren van de gemaakte afspraken op Nederlands en Europees niveau.

Onderzoeksvraag

- In deze studie is de **beschikbaarheid** van **duurzame energiedragers** (en de grondstoffen daarvoor) voor de luchtvaart in **Nederland** tussen **nu en 2050 geanalyseerd**. Het gaat hierbij om de vraag naar duurzame energiedragers voor vanuit Nederland vertrekkende vliegtuigen. Aan de hand hiervan zijn knelpunten geïdentificeerd voor de beschikbaarheid van deze energiedragers voor de Nederlandse luchtvaart. De resultaten kunnen worden gebruikt voor het formuleren van een strategie rondom duurzame luchtvaartbrandstoffen.

Scope

- De volgende duurzame **energiedragers** zijn meegenomen in de studie: hernieuwbare elektriciteit, hernieuwbare waterstof, bio-kerosine ('bio-SAF') en synthetische kerosine uit hernieuwbare waterstof ('e-SAF').
- De toekomstige vraag naar duurzame energiedragers in Nederland is gebaseerd op de **verwachte ontwikkeling** (WLO 2015¹) van de Nederlandse luchtvaartvraag en de huidige regelgeving.
- Eventuele **vraaguitval** door hogere ticketprijzen o.b.v. duurzame energiedragers (prijselasticiteit) is niet meegenomen in dit project. Ook is niet gekeken naar de ontwikkeling van de Europese of wereldwijde vraag en de mogelijke impact hiervan op de marktdynamiek van energiedragers en grondstoffen.
- Het **aanbod** van duurzame energiedragers is gebaseerd op aangekondigde bedrijfsplannen voor toekomstige productie en de beschikbaarheid van grondstoffen; de benodigde investeringen in infrastructuur en opslag-/import-capaciteit en het vereiste ruimtegebruik voor productiefaciliteiten zijn hierin niet meegenomen. Omdat de mate waarin de grondstoffen en energiedragers beschikbaar komen voor de Nederlandse luchtvaart onzeker is, is hier gebruik gemaakt van scenario's.

Bron: 1) PBL en CPB (2015) 'Nederland in 2030-2050: twee referentiescenario's – Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving'

Methodiek

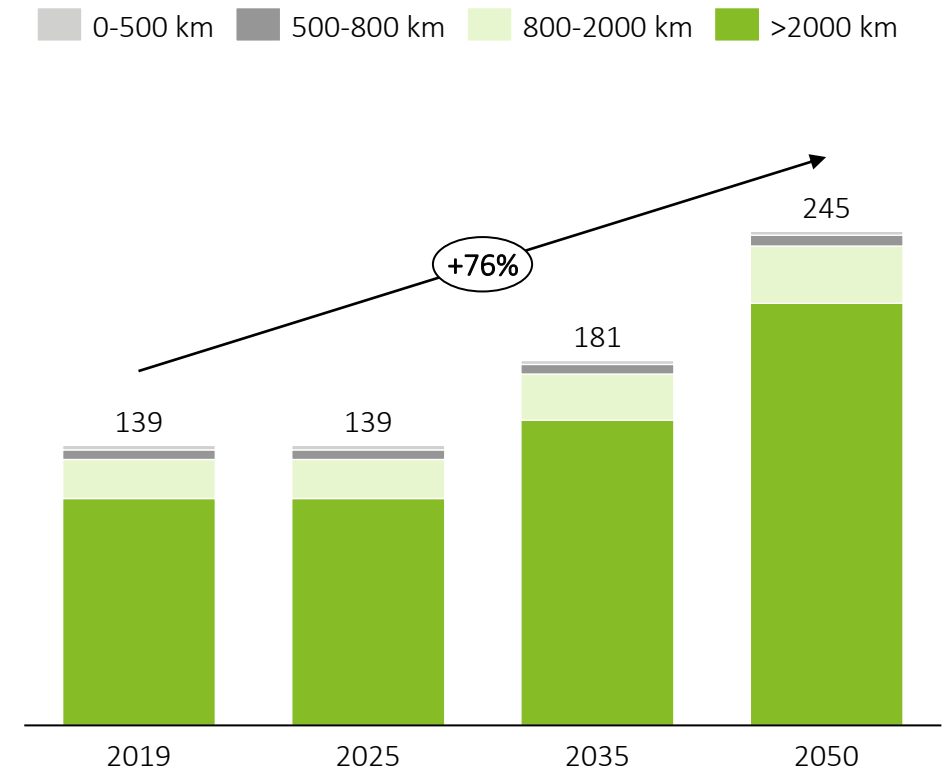
De vraag naar duurzame energiedragers is ingeschat op basis van de verwachte Nederlandse luchtvaartvraag, de toepassing van nieuwe aandrijftechnologieën en geldende wetgeving voor de toepassing van SAF

Vraag naar duurzame energiedragers

- De **vraag naar energiedragers** is ingeschat op basis van de verwachte ontwikkeling van de **luchtvaartvraag** en de geldende **Europese wetgeving** die voorschrijft welk percentage van de energieconsumptie ingevuld dient te worden met duurzame energiedragers. Het gaat hierbij om de vraag naar duurzame energiedragers voor vanuit Nederland vertrekkende vliegtuigen.
- De vraagontwikkeling is gebaseerd op de meest recente Welvaart en Leefomgeving (WLO) **scenario's van het PBL** en het CPB uit 2015. Hierbij zijn de scenario's gebruikt die rekening houden met beperkte capaciteit van luchthavens door fysieke omvang of afspraken ('gerestricteerd'). Vervolgens zijn de jaarlijkse groeifactoren uit de WLO-scenario's berekend en toegepast vanaf 2025 met de aanname dat er geen groei heeft plaatsgevonden tussen 2019-2025 (aangezien naar verwachting het vliegverkeer in 2025 weer op het niveau zal zijn van 2019¹).
- Hoewel in dit onderzoek de 'gerestricteerde' scenario's van de WLO 2015 zijn genomen als uitgangspunt (op basis van restricties omtrent de groei van Schiphol zoals vastgelegd in de Alders-akkoorden), is de groeiverwachting van de luchtvaartvraag uit de WLO-scenario's naar verwachting alsnog aan de hoge kant (+76% tot '50 t.o.v. '25). In de WLO-scenario's wordt namelijk geen rekening gehouden met verdergaand beleid om de luchtvaart te beperken. Vandaar dat voor de korte-afstandsvluchten (<800km) de **groeiverwachting** van de WLO-scenario's in dit onderzoek naar beneden is bijgesteld (voor <500km van gemiddeld +47% naar -20% en 500-800km van +47% naar +14%), omdat luchtvaartmaatschappijen bij vliegbewegingrestricties, naar verwachting bij voorkeur korte vluchten zullen beperken. In 2025 worden de nieuwe WLO-scenario's gepubliceerd. Wanneer deze beschikbaar komen, kunnen de resultaten van het onderzoek geactualiseerd worden op basis van deze nieuwe verwachte vraagontwikkeling.

Noot: 1) Op basis van bron: Eurocontrol (2024) 'Forecast Update 2024-2030'; PBL, CPB (2015) "Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving scenario's"

Verwachte Nederlandse luchtvaartvraag (miljard stoelkilometers)



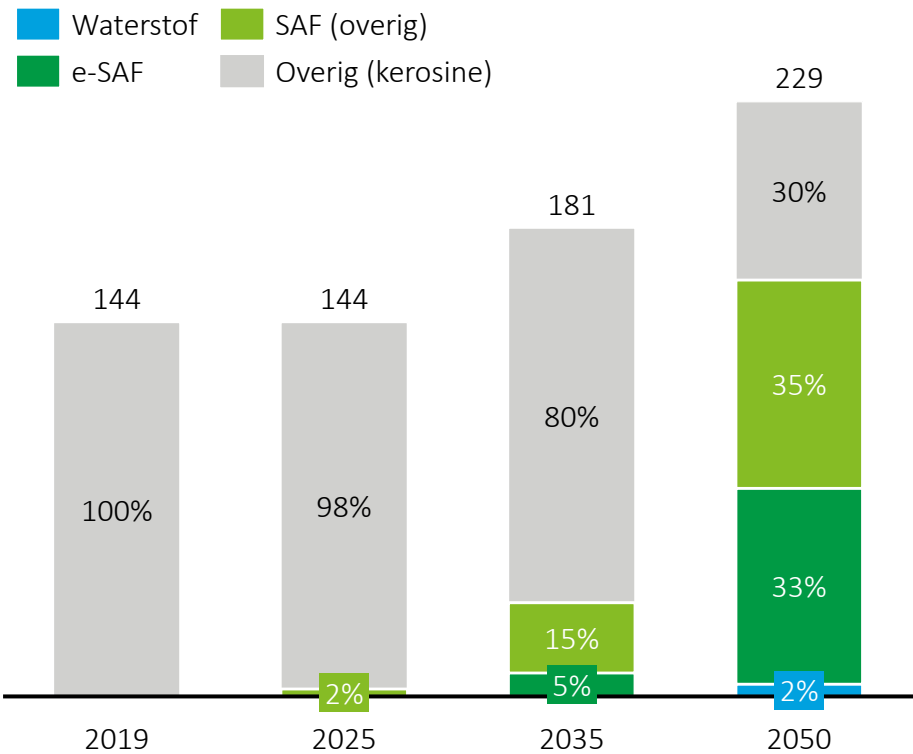
Methodiek

De vraag naar duurzame energiedragers is ingeschat op basis van de verwachte Nederlandse luchtvaartvraag, de toepassing van nieuwe aandrijftechnologieën en geldende wetgeving voor de toepassing van SAF

Vraag naar duurzame energiedragers

- De verwachte ontwikkeling van de luchtvaartvraag per afstandscategorie is vertaald naar de vraag naar verschillende energiedragers. Hiervoor is gebruik gemaakt van de laatste inzichten in realistische capaciteit en bereik van **nieuwe aandrijftechnologieën** – elektrisch, hybride-elektrisch en waterstof-vliegen. De vliegtuigconcepten die nu ontwikkeld worden zijn alleen geschikt voor afstanden tot 2000km en hebben capaciteit van max 80 stoelen. Hierdoor is ook de inzet in stoelkilometers beperkt. Bij de beschrijving van knelpunt 1 en in de appendix gaan we in op de onderbouwing hiervan en de onzekerheden over deze technologieën.
- Voor de conventionele vliegtuigen is de vraag naar energiedragers gesplitst in vraag naar kerosine en vraag naar duurzame vliegtuigbrandstof (SAF) op basis van de **Europese ‘ReFuelEU’ wetgeving**. ReFuelEU specificeert voor de periode tot aan 2050 stapsgewijs het verplichte percentage SAF en een sub-verplichting voor synthetische vliegtuigbrandstof (ofwel waterstof ofwel synthetische SAF (e-SAF)).
- Met deze methodiek is de **vraag naar luchtvaartbrandstoffen** ingeschat op ~140 PJ in 2025 waarvan 2% SAF, groeiend tot ~230 PJ in 2050 waarvan 2% waterstof, 33% e-SAF en 35% ‘overige SAF vraag’. De overige SAF-vraag volgt uit de SAF-verplichting en de e-SAF sub-verplichting, en kan worden ingevuld met zowel bio-SAF als e-SAF.

Vraag naar luchtvaartbrandstoffen (PJ)



Noot: 1) European Commission (2023) 'Regulation (EU) 2023/2405 - ReFuelEU Aviation'

Methodiek

De ontwikkeling van het aanbod van energiedragers richting 2050 is ingeschat op basis van productieplannen, verwachte grondstoffenbeschikbaarheid en scenario's voor de beschikbaarheid voor de NL luchtvaart

Aanbod van duurzame energiedragers [1/2]

- Hoe de vraag kan worden ingevuld, hangt af van het aanbod van energiedragers. Het aanbod hangt weer af van de totale grondstoffenbeschikbaarheid, de productiecapaciteit van energiedragers en de mate waarin deze grondstoffen en energiedragers voor de Nederlandse luchtvaart beschikbaar komen.

Grondstoffenbeschikbaarheid

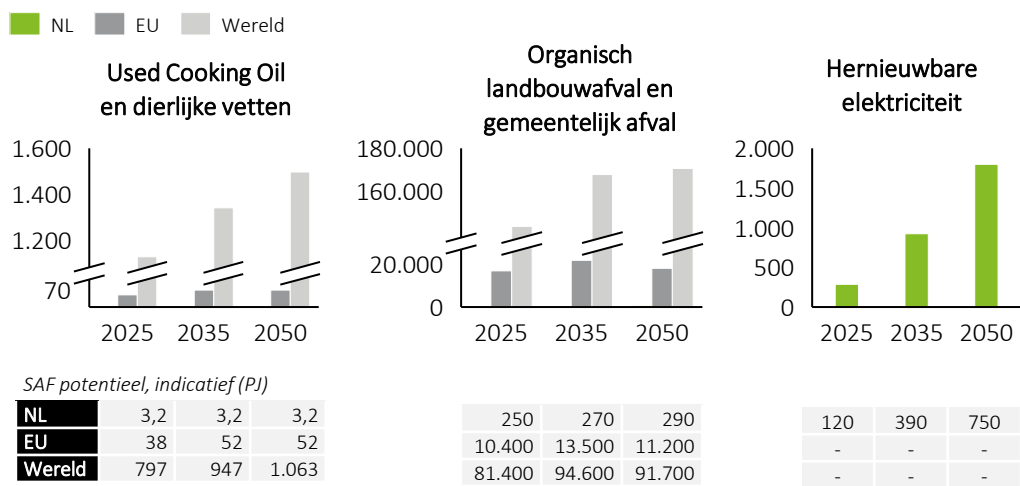
- De beschikbaarheid van grondstoffen kan een beperkende factor worden voor de productie van energiedragers. Daarom is een **inschatting gemaakt van de beschikbaarheid** van de belangrijkste grondstoffen voor SAF wereldwijd (Used Cooking Oil, dierlijke vetten, landbouwafval, overig afval en hernieuwbare elektriciteit) en de totale potentiële hoeveelheid SAF die hiervan gemaakt kan worden (via de verschillende productiemethodes).

Productiecapaciteit

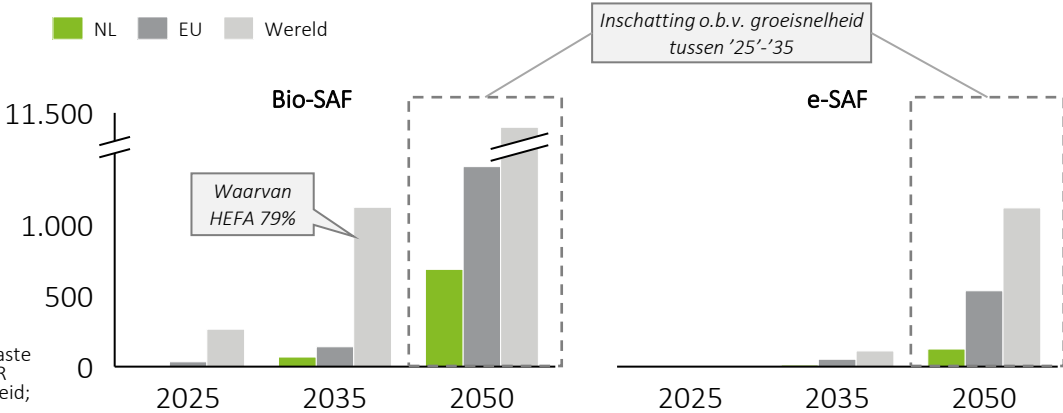
- Het verwachte aanbod van SAF is ingeschat op basis van de huidige, wereldwijd bekende **operationele productiefaciliteiten** en de **bedrijfsplannen** voor nieuwe faciliteiten (ook zonder finale investeringsbeslissingen). Op basis hiervan kan een inschatting gemaakt worden van het mogelijke aanbod van SAF tot aan 2035. Hierbij is de aanname dat de productiefaciliteiten die operationeel zullen zijn in 2035 hun plan nu al bekend hebben gemaakt (vanwege de lange aanlooptijd vanaf ontwerpfase tot operationele productie).
- De ontwikkeling van de **productiecapaciteit richting 2050**, is dit op dit moment nog onzeker. In de analyse is aangenomen dat de jaarlijkse groei die verwacht wordt tot aan 2035 (~16%) op eenzelfde manier zal doorzetten tot aan 2050 (dit komt neer op een factor 10 schaalvergroting tussen 2035 en 2050).

Noot: 1)Argus (2024) 'Webinar: the fight for feedstocks: UCO markets in 2024 and beyond', Transport & Environment (2024) 'European and US used cooking oil demand increasingly unsustainable – analysis'; CE Delft (2020) 'Bio-Scope'; CBS (2024) 'Municipal waste; quantities'; UNEP (2024) 'Global Waste Management Outlook 2024', ICCT (2024) 'Availability of biomass feedstocks in the European Union to meet the 2035 ReFuelEU Aviation SAF target', NLR (2021) 'Feedstocks for sustainable aviation fuels in the Netherlands'. 2) o.b.v. Deloitte Company Database, onafhankelijk van grondstoffen beschikbaarheid;

Grondstoffenbeschikbaarheid (PJ)¹



Verwachte ontwikkeling van SAF-productiecapaciteit (PJ)²



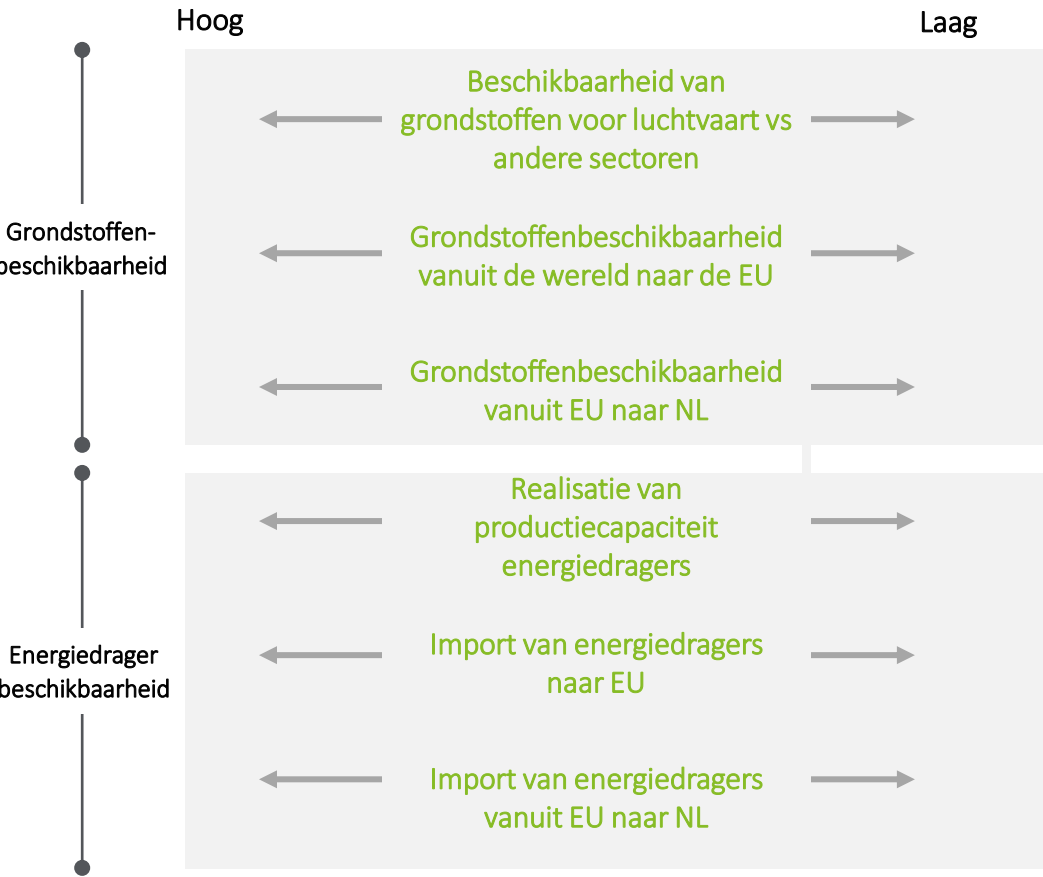
Methodiek

Gezien de onzekerheden in de beschikbaarheid van grondstoffen en energiedragers voor de Nederlandse luchtvaart, is gebruik gemaakt van twee scenario's die deze onzekerheden reflecteren

Aanbodscenario's

- De mate waarin de grondstoffen en energiedragers voor de Nederlandse luchtvaart beschikbaar komen hangt af van de beschikbaarheid van grondstoffen voor de luchtvaart versus andere sectoren (o.b.v. betalingsbereidheid), importmogelijkheden van grondstoffen (vanuit wereld en EU), verwachte realisatie van productieplannen en importmogelijkheden van energiedragers (vanuit wereld en EU). Hoe dit zich zal ontwikkelen is erg onzeker. Om deze **onzekerheid** te reflecteren is in deze analyse gebruik gemaakt van twee **scenario's**. We gebruiken deze scenario's om te beschrijven wat de meest uiteenlopende maar wel realistische mogelijke ontwikkelingen kunnen zijn waarmee rekening moet worden gehouden.
- In een **scenario met hoge beschikbaarheid** is de betalingsbereidheid van de luchtvaart voor duurzame energiedragers (incl. waterstof) hoog t.o.v. andere sectoren omdat de Europese luchtvaart een verplichting tot verduurzaming heeft, maar weinig alternatieven om de vraag in te vullen (vanwege beperkingen bij alternatieve aandrijftechnologieën). Er zijn ook voldoende mogelijkheden voor import van deze energiedragers omdat handelsbetrekkingen goed zijn. In dit scenario is alle productie van bio-SAF grondstoffen (REDIII Annex IX) wereldwijd beschikbaar voor de Europese Unie en krijgt Nederland zijn 'eerlijke deel' (op basis van de Nederlandse luchtvaartvraag als percentage van totale luchtvaartvraag in de EU). Landen buiten de EU zullen bio-SAF maken met alternatieve bio-grondstoffen (energiegewassen) die in Europa niet zijn toegestaan als grondstof voor bio-SAF. Hiermee komen alle wereldwijd beschikbare biologische afvalstromen (REDIII Annex IX bio-grondstoffen) beschikbaar voor de EU.
- In een **scenario met lage beschikbaarheid** veroorzaken grote geopolitieke verstoringen en zware concurrentie van nieuwe afnemers (andere landen) een zeer beperkte beschikbaarheid van bio-grondstoffen voor de Nederlandse luchtvaart. Daarnaast kan de beschikbaarheid van bepaalde bio-grondstoffen beperkt worden door vraag vanuit andere toepassingen voor deze bio-grondstoffen. Ten slotte kan de opschaling van SAF-productiecapaciteit tegenvallen wanneer een gedeelte van de aangekondigde productieplannen toch niet door gaat.

Scenario variabelen



Methodiek

De scenario's kennen verschillen wat betreft de grondstoffenbeschikbaarheid en wat betreft de energiedragerbeschikbaarheid

Scenario variabelen - zie appendix voor gebruikte uitgangspunten en gekwantificeerde aannames

Grondstoffen- beschikbaarheid	Beschikbaarheid van grondstoffen voor luchtvaart vs andere sectoren	Het percentage van grondstoffen dat gebruikt wordt voor de luchtvaart (ten opzichte van gebruik voor andere sectoren) is afhankelijk van de betalingsbereidheid . Deze is, door de huidige regelgeving, hoog voor luchtvaart, maar strengere eisen in een andere sector kunnen ervoor zorgen dat vrijwel alle grondstoffen naar een andere sector gaan. Daarom heeft deze variabele een zeer grote bandbreedte , zie p.50 in de appendix voor de gebruikte uitgangspunten en gekwantificeerde aannames.
	Grondstoffenbeschikbaarheid vanuit de wereld naar de EU	Het percentage van grondstoffen dat beschikbaar is voor import van de Europese Unie uit de rest van de wereld hangt af van marktdynamiek. Aangezien landen buiten de EU andere grondstoffen zoals energiegewassen kunnen gebruiken voor bio-SAF productie is het in het uiterste geval mogelijk dat REDIII-afvalstromen vrijwel geheel voor de EU beschikbaar komen. Echter, bij significante handelsbelemmeringen en schaarste kan dit ook sterk beperkt worden. Daarom heeft deze variabele een zeer grote bandbreedte , zie p.50 in de appendix voor de gebruikte uitgangspunten en gekwantificeerde aannames.
	Grondstoffenbeschikbaarheid vanuit EU naar NL	Het percentage van grondstoffen dat beschikbaar is voor import van Nederland uit de EU (zowel grondstoffen uit de EU als grondstoffen uit de rest van de wereld die beschikbaar zijn voor de EU) is ingeschat op basis van het 'eerlijke deel' voor Nederland (o.b.v. luchtvaartvraag). Omdat we de EU als stabiel beschouwen en alle landen dezelfde doelstellingen volgen, heeft deze variabele geen bandbreedte .
Energiedrager beschikbaarheid	Realisatie van productiecapaciteit energiedragers	Het percentage van de aangekondigde bedrijfsplannen dat gerealiseerd wordt hangt af van de ontwikkeling van de markt. Huidige angekondigde plannen kunnen niet doorgaan en er kunnen in de komende jaren nieuwe plannen bijkomen voor productiefaciliteiten die operationeel worden voor 2035. Daarom heeft deze variabele een grote bandbreedte , zie p.51 in de appendix voor de gebruikte uitgangspunten en gekwantificeerde aannames.
	Import van energiedragers naar EU	Het percentage van energiedragers dat beschikbaar is voor import van de EU uit de rest van de wereld (i.e. energiedragers die geproduceerd zijn buiten de EU) hangt af van marktdynamiek. Door de relatief harde verplichting voor SAF-consumptie in de EU t.o.v. het buitenland is het aannemelijk dat een groot gedeelte van de SAF naar de EU zal gaan. Echter, schaarste en handelsbelemmeringen kunnen beperkend werken. Daarom heeft deze variabele een zeer grote bandbreedte , zie p.52 in de appendix voor de gebruikte uitgangspunten en gekwantificeerde aannames.
	Import van energiedragers vanuit EU naar NL	Het percentage van energiedragers dat beschikbaar is voor import van Nederland uit de EU (zowel energiedragers die geproduceerd zijn in de EU als energiedragers uit de rest van de wereld die beschikbaar zijn voor de EU) is ingeschat op basis van het 'eerlijke deel' voor Nederland (o.b.v. luchtvaartvraag). Omdat we de EU als stabiel beschouwen en alle landen dezelfde doelstellingen volgen, heeft deze variabele geen bandbreedte .

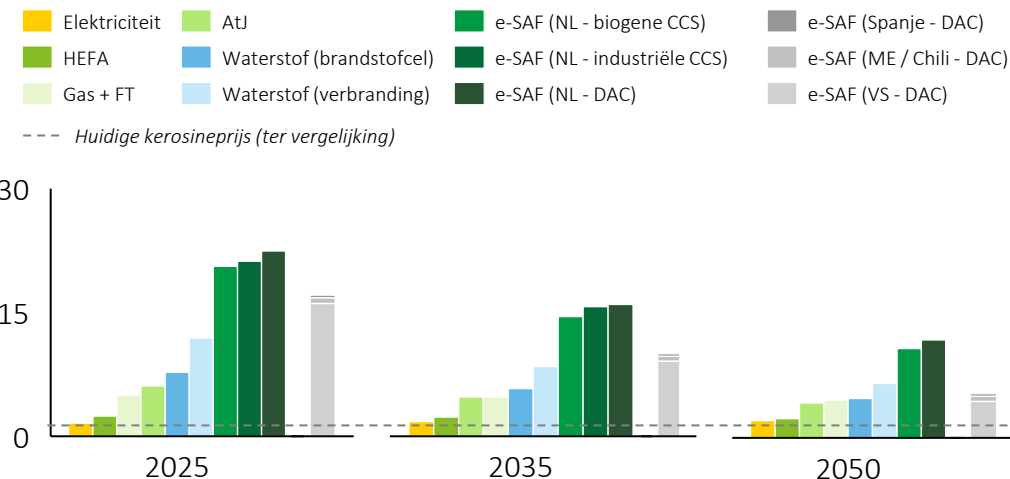
Methodiek

De vraag zal worden ingevuld door goedkoopste energiedragers voor zover ze beschikbaar zijn en binnen de randvoorwaarde van beleid en mogelijkheden van technologie

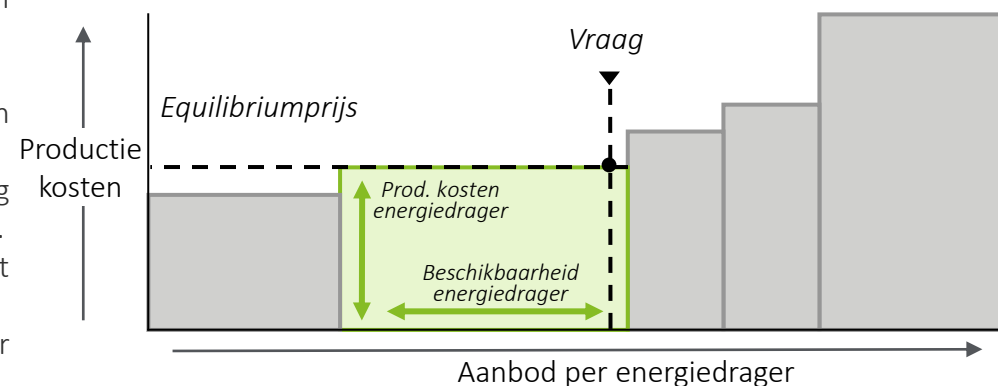
Invulling van de vraag op basis van het aanbod

- We gaan ervan uit dat de vraag wordt ingevuld door de goedkoopste energiedragers voor zover die beschikbaar zijn en binnen de randvoorwaarde van beleid en mogelijkheden van technologie – oftewel op de meest **economisch meest efficiënt** manier.
- De **inschatting van de productiekosten** van de verschillende energiedragers over tijd is gedaan op basis van de vervolgende verwachtingen (dit zijn productiekosten dus geen marktprijzen):
 - Productiekosten voor bio-SAF op basis van HEFA zullen nagenoeg gelijk blijven, aangezien dit een bekende en al veel toegepaste technologie is.
 - Productiekosten voor nieuwere methoden om bio-SAF te maken, op basis van Gasification en Fischer-Tropsch (Gas + FT) en Alcohol-to-Jet (AtJ), zullen afnemen door technologieontwikkeling en schaalvoordelen.
 - E-SAF productie is op dit moment beperkt tot relatief kleine opstellingen; door leereffecten en schaalvergroting zullen de productiekosten met ~40% gaan dalen tot 2050. Daarmee resteert elektriciteit als belangrijkste kostendrijver.
 - De productiekosten van hernieuwbare elektriciteit in Nederland zullen niet meer sterk dalen. In specifieke delen van de wereld, met name rond de evenaar, zullen de elektriciteitskosten naar verwachting significant goedkoper blijven dan in Nederland. De productie van e-SAF en waterstof op basis van Nederlandse stroom zal daarom niet competitief zijn.
- Op basis van **deze analyse** zal de vraag naar luchtvaartbrandstoffen ingevuld worden door...:
 - ... elektriciteit en evt. waterstof in het beperkte segment waar de capaciteit en het bereik van deze vliegtuigen commercieel aantrekkelijk is.
 - ... kerosine te gebruiken voor het gedeelte van de vraag buiten de ReFuelEU verplichting onder de aanname dat kerosine goedkoper blijft dan SAF o.a. onder invloed van OPEC beleid.
 - ... de ReFuelEU sub-verplichting voor synthetische luchtvaartbrandstof in te vullen met geïmporteerde e-SAF van buiten de EU.
 - ... de rest van de ReFuelEU SAF-verplichting in te vullen met HEFA bio-SAF voor zover mogelijk en anders andere typen bio-SAF (Gas + FT en AtJ).

Ontwikkeling van productiekosten (€c per stoelkm; constant prijspeil 2024)



Economisch efficiënte invulling van vraag o.b.v. beschikbaar aanbod - conceptueel



Appendix Aannames



Introductie

Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat wil inzicht in het aanbod van en de vraag naar duurzame energiedragers, om beter begrip te krijgen over mogelijke knelpunten die de komende jaren kunnen optreden

Context

- In 2015 werd het Akkoord van Parijs ondertekend met als doel de opwarming van de aarde ruim onder de 2°C te houden en inspanningen te leveren om de temperatuurstijging te beperken tot 1,5°C. In 2020 stelde de Nederlandse regering samen met de luchtvaartsector in dat kader het Akkoord Duurzame Luchtvaart op dat de volgende afspraken bevat over de **emissiereductie** binnen de luchtvaart en het daarvoor benodigde **gebruik van duurzame energiedragers (SAF)**: 14% in 2030 en 100% in 2050.
- Daarna heeft ook de Europese Unie (EU) **doelstellingen voor luchtvaartbrandstoffen** vastgesteld: in 2025 moet luchtvaartbrandstof voor 2% uit SAF bestaan, oplopend tot 70% in 2050.
- **Uitdagingen** bij de transitie naar gebruik van duurzame energiedragers zijn, onder andere, de opschaling van productiecapaciteit voor duurzame energiedragers, beschikbaarheid van grondstoffen en technologieontwikkeling (zowel wat betreft nieuwe type vliegtuigen als voor productie van energiedragers).
- Ieder van bovenstaande uitdagingen kan leiden tot specifieke **knelpunten** bij het realiseren van de gemaakte afspraken op Nederlands en Europees niveau.

Onderzoeksvraag

- In deze studie is de **beschikbaarheid** van **duurzame energiedragers** (en de grondstoffen daarvoor) voor de luchtvaart in **Nederland** tussen **nu en 2050 geanalyseerd**. Het gaat hierbij om de vraag naar duurzame energiedragers voor vanuit Nederland vertrekkende vliegtuigen. Aan de hand hiervan zijn knelpunten geïdentificeerd voor de beschikbaarheid van deze energiedragers voor de Nederlandse luchtvaart. De resultaten kunnen worden gebruikt voor het formuleren van een strategie rondom duurzame luchtvaartbrandstoffen.

Scope

- De volgende duurzame **energiedragers** zijn meegenomen in de studie: hernieuwbare elektriciteit, hernieuwbare waterstof, bio-kerosine ('bio-SAF') en synthetische kerosine uit hernieuwbare waterstof ('e-SAF').
- De toekomstige vraag naar duurzame energiedragers in Nederland is gebaseerd op de **verwachte ontwikkeling** (WLO 2015¹) van de Nederlandse luchtvaartvraag en de huidige regelgeving.
- Eventuele **vraaguitval** door hogere ticketprijzen o.b.v. duurzame energiedragers (prijselasticiteit) is niet meegenomen in dit project. Ook is niet gekeken naar de ontwikkeling van de Europese of wereldwijde vraag en de mogelijke impact hiervan op de marktdynamiek van energiedragers en grondstoffen.
- Het **aanbod** van duurzame energiedragers is gebaseerd op aangekondigde bedrijfsplannen voor toekomstige productie en de beschikbaarheid van grondstoffen; de benodigde investeringen in infrastructuur en opslag-/import-capaciteit en het vereiste ruimtegebruik voor productiefaciliteiten zijn hierin niet meegenomen. Omdat de mate waarin de grondstoffen en energiedragers beschikbaar komen voor de Nederlandse luchtvaart onzeker is, is hier gebruik gemaakt van scenario's.

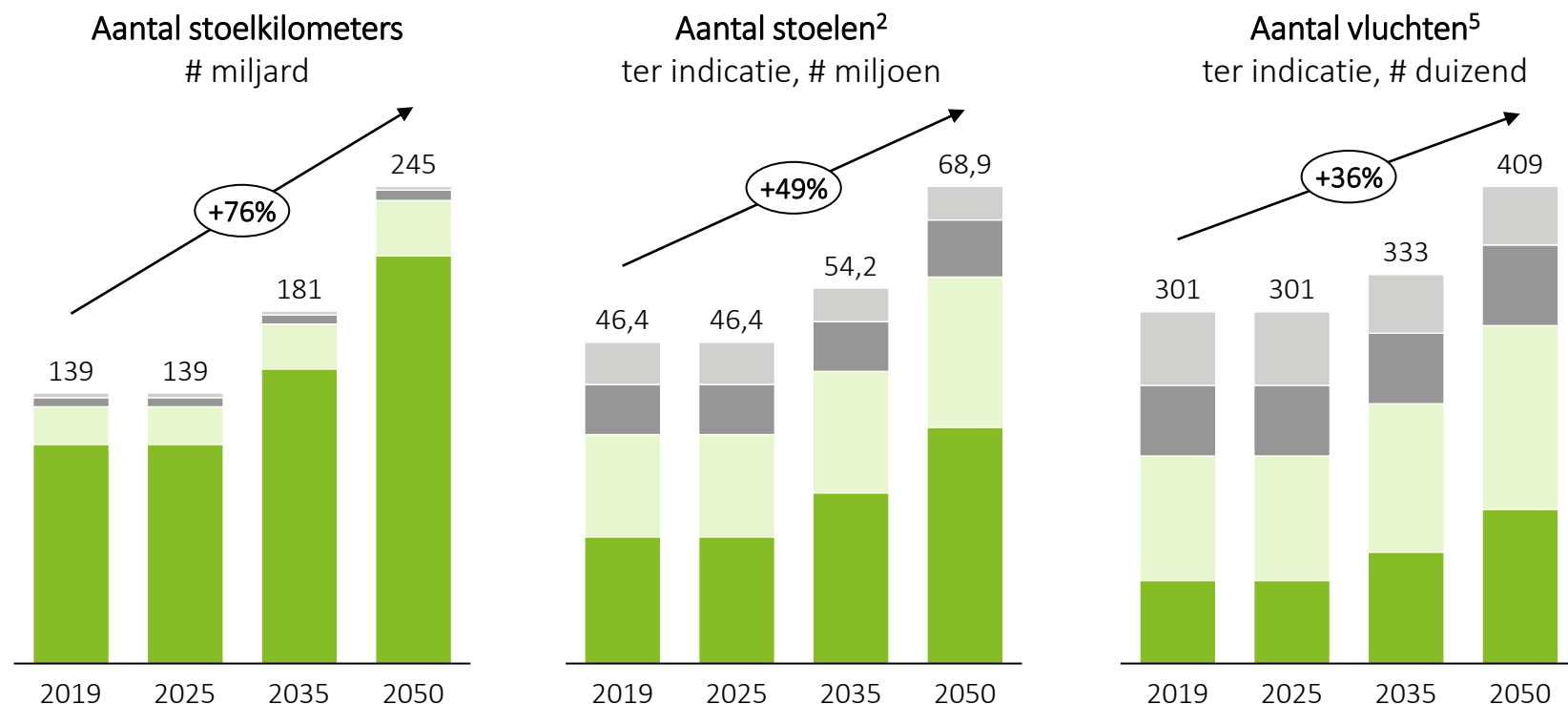
Bron: 1) PBL en CPB (2015) 'Nederland in 2030-2050: twee referentiescenario's – Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving'

Appendix | Vraagontwikkeling

De verwachting is dat de luchtvaartvraag gaat toenemen, met name voor langeafstandsvluchten

Verwachte Nederlandse luchtvaartvraag¹

0-500 km 500-800 km 800-2000 km >2000 km



- Door de verwachte luchtvaartgroei, met name op de **lange afstanden**, groeit het aantal stoelkilometers (+76%)
- De groei van het aantal stoelen is kleiner (+49%) door de verwachte **modal shift op kortere afstanden**
- Deze verwachte vraagontwikkeling is in lijn met de **verwachtingen van het PBL** o.b.v. huidig beleid³
- **Drijvende krachten** voor de ontwikkeling zijn onder andere **bevolkingsgroei, inkomensgroei, handelsgroei**; verwachte hogere **ticketprijzen** door beleidsmaatregelen werken beperkend⁴

Noten: 1) Luchtvaartvraag gedefinieerd als het aantal vertrekkende vluchten vanaf Nederlandse luchthavens (excl Caribisch gebied); 2) Op basis van constante gewogen gemiddelde vluchtafstand per afstandscategorie over de jaren (2019-2050), waarbij het 'gewogen gemiddelde' refereert naar de gemiddelde vluchtafstand per vlucht naar rato van het aantal stoelen per vlucht; 3) Het PBL verwacht een totaal van ~137 miljoen passagiers in 2050 (zowel vertrekkend als aankomend) wat aansluit bij de verwachting van ~70 miljoen stoelen capaciteit voor vertrekkende vluchten bij gelijk aantal vertrekkende en aankomende passagiers (Bron: PBL & TNO (2024) 'Klimaatneutrale Luchtvaart in 2050'); 4) Selectie van invoerparameters in de passagiersmodule van het Aeolus model zoals gebruikt voor de WLO luchtvaartscenario's (Bron: PBL/CPB (2016) Achtergronddocument Mobiliteit Luchtvaart) 5) 1) Op basis van 2019-technologie-toepassing, constante gemiddelde vliegtuigcapaciteit per afstandscategorie over de jaren (2019-2050) en constante gewogen gemiddelde vluchtafstand per afstandscategorie over de jaren (2019-2050);

Bronnen: Eurocontrol 2019 vluchtdata, PBL/CPB WLO-scenario's 2015, AHEV 2022, To70, PBL & TNO (2024) 'Klimaatneutrale Luchtvaart in 2050'

Appendix | Vraagontwikkeling

De vraagontwikkeling is gebaseerd op de WLO-scenario's van het PBL en CPB uit 2015, bijgesteld op basis van expertise van Deloitte en To70

Data

Jaarlijkse groeifactor (%)	WLO-scenario's 2015							
	Ongeëstreeerde groei ¹				Geëstreeerde groei ²			
	Tot 2030		2030-2050		Tot 2030		2030-2050	
	Laag	Hoog	Laag	Hoog	Laag	Hoog	Laag	Hoog
	2,8	4,6	1,4	2,0	2,6	3,0	1,5	2,0
Totaal aantal passagiers	2,8	4,6	1,4	2,0	2,6	3,0	1,5	2,0
OD binnen Europa	2,4	4,3	1,0	1,4	2,0	2,0	1,1	1,8
OD intercontinentaal	3,0	5,0	1,7	2,6	3,0	4,7	1,7	2,6



Vraagontwikkeling

Luchtvaartvraag (# stoelkm) t.o.v. 2019 ³	Op basis van groeifactoren uit WLO-scenario's 2015, toegepast vanaf 2025 (met aanname van 0% groei tussen 2019-2025) ³											
	Ongeëstreeerde groei ¹						Geëstreeerde groei ²					
	2025		2035		2050		2025		2035		2050	
	Laag	Hoog	Laag	Hoog	Laag	Hoog	Laag	Hoog	Laag	Hoog	Laag	Hoog
	100%	100%	123%	138%	152%	186%	100%	100%	123%	128%	154%	172%
Totaal # passagiers	100%	100%	123%	138%	152%	186%	100%	100%	123%	128%	154%	172%
OD binnen Europa	100%	100%	118%	132%	136%	164%	100%	100%	117%	121%	137%	158%
OD intercontinentaal	100%	100%	126%	145%	162%	214%	100%	100%	126%	143%	163%	209%



Referentie waardes voor de afstandscategorieën: 0-500 km, 500-800 km en 800-2000 km



Referentie waardes voor de afstandscategorie: >2000 km

Noot: 1) Uitkomst van WLO scenario met onbeperkte capaciteit van luchthavens; 2) Uitkomst van WLO scenario rekening houdend met capaciteit van luchthavens die beperkt wordt door fysieke omvang of afspraken; 3) Op basis van jaarlijkse groeifactoren van 2013-2030 en 2030-2050 uit de WLO-scenario's 2015, toegepast vanaf 2025 met de aanname dat er 0% groei heeft plaatsgevonden tussen 2019-2025, en met de aanname dat de groei in aantal passagiers hetzelfde is als de groei in aantal stoelkm; Bronnen: PBL/CPB WLO-scenario's 2015 (WLO Mobiliteit – luchtvaart referentiescenarios en aanvullende onzekerheidsverkenningen), To70

Appendix | Vliegtuigtechnologie

Er is een breed scala aan aangekondigde vliegtuigconcepten die uiteenlopen qua capaciteit, ontwikkeltijdslijn en maximale afstand

Overzicht van aangekondigde vliegtuigconcepten per technologie¹

Dikgedrukte voorbeelden zijn opgenomen in slide 10

Type	Vliegtuigbouwer	Vliegtuigconcept	Max. capaciteit	Entry-into-service (EIS)	Max. afstand bij max. lading	Bronnen
Elektrisch	Pipistrel	Virus SW	2	Operationeel	890 NM = 1650 km	https://www.pipistrel-aircraft.com/
	Diamond	eDA40	2-3	2025	117 NM = 220 km	https://www.diamondaircraft.com/en/flight-school-solution/aircraft/eda40/overview/
	Auro Aero	Era ²	19	2028	200 NM = 370 km	https://auro-aero.com/en/era/#characteristics
	Wright	Wright Spirit BAe 146	100	N/A (retrofit)	1 hour = ~700 km	https://www.weflywright.com/aircraft
	Heart Aerospace	ES-30 (full electric)	30	2028 (type certification)	200 km (all-electric range)	https://heartaerospace.com/es-30/
	Cosmic Aerospace	Cosmic Skylark	24	2029	1000 km	https://www.cosmicaerospace.com/
	Eviation	Alice	9	2030	250 NM = 460 km	https://www.ainonline.com/aviation-news/futureflight/2024-04-29/eviation-reveals-latest-redesign-alice-electric-airplane
	Vaeridion	Microliner	9	2030	500 km	https://vaeridion.com/
	Elysian	E9X	90	2033	800 km	https://www.elysianaircraft.com/
	Embraer	Energia Electric	9	2035	200 NM = 370 km	https://embraercommercialaviationsustainability.com/concepts/
Waterstof	H2FLY	HY4 (Demonstrator)	2	Pilot completed	1500 km	https://www.h2fly.de/2023/09/07/h2fly-and-partners-complete-worlds-first-piloted-flight-of-liquid-hydrogen-powered-electric-aircraft/
	ZeroAvia	ZA600 (powertrain, e.g. + Cessna)	10-20	2025	250 NM = 460 km	https://zeroavia.com/za600/
	ZeroAvia	ZA2000 (powertrain, e.g. +ATR42/72)	40-80	2027	1000 NM = 1850 km	https://zeroavia.com/za2000/
	Conscious	Conscious (H2 fuel cell)	30	2028	750 km	https://www.rotterdamthehagueairport.nl/nieuws/item/conscious-aerospace-zet-cruciale-stap-in-luchtvaart-op-waterstof-met-feestelijke-inauguratie-hangaar-op-rtha/
	Embraer	Energia H2 Fuel Cell E30-H2FC	30	2035	200 NM = 370 km	https://embraercommercialaviationsustainability.com/concepts/
	Airbus	ZEROe Turboprop	<100	2035	1000 NM = 1850 km	https://www.airbus.com/en/innovation/energy-transition/hydrogen/zeroe
Waterstof-ICE ³	Embraer	Energia H2 Gas Turbine E50-H2GT	50	2040	500 NM = 926 km	https://embraercommercialaviationsustainability.com/concepts/
	Airbus	ZEROe Turbofan	<200	2035	2000 NM = 3700 km	https://www.airbus.com/en/innovation/energy-transition/hydrogen/zeroe
	Fokker	Fokker Next Gen (Fokker 100)	120-150	2035	1400 NM = 2590 km	https://www.fokkernextgen.com/the-aircraft
Hybride	Ampaire	Eco Caravan	9	2025	1100 Mi = 1770 km	https://www.ampaire.com/vehicles/eco-caravan
	Ampaire	Eco Otter	19	2026	700 Mi = 1120 km	https://www.ampaire.com/vehicles/eco-otter-aircraft
	Embraer	Energia Hybrid E30-HE	30	2030+	500 NM = 926 km	https://embraercommercialaviationsustainability.com/concepts/
	ATR	EVO	42/72	2030	740 NM = 1370 km	https://www.atr-aircraft.com/innovation/atr-evo-concept/
	Maeve	M-80	80	2031	800 NM = 1480 km	https://maeve.aero/aircraft
	Heart Aerospace	ES-30	30	2028 (type certification)	800 km	https://heartaerospace.com/es-30/

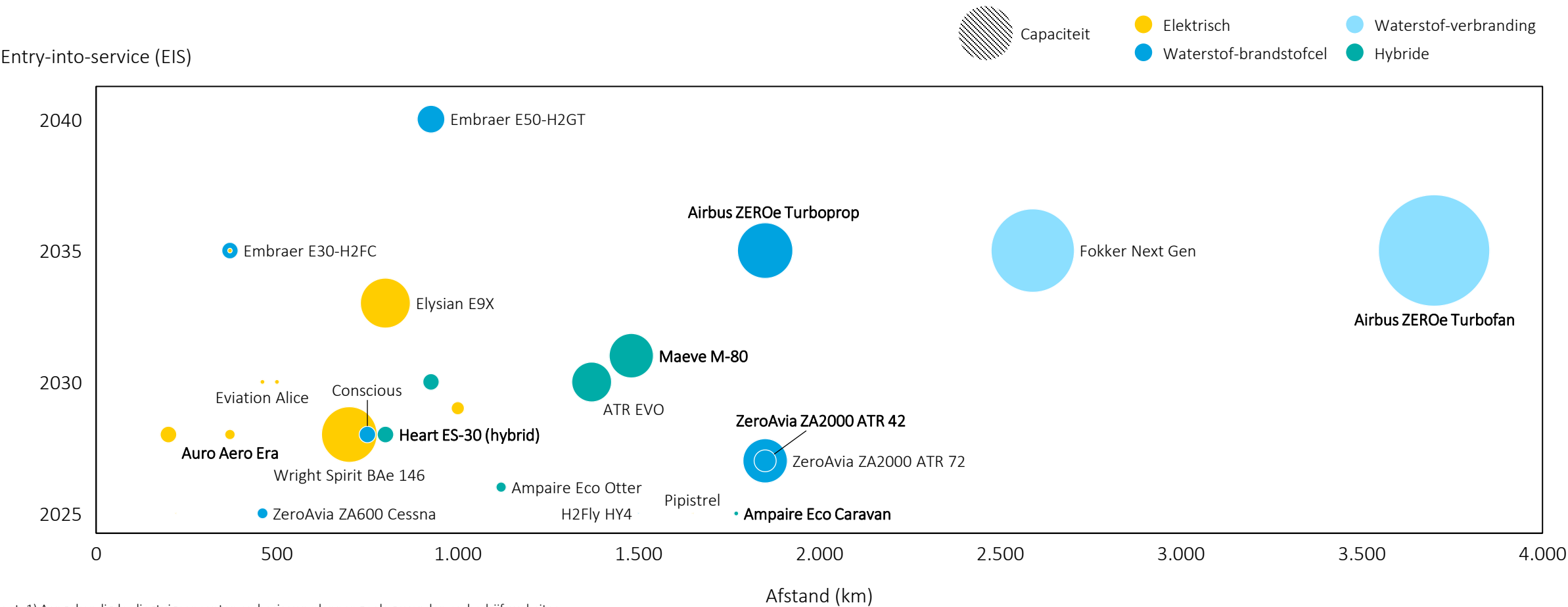
Noten: 1) De tabel is geordend per technologie en vervolgens naar verwachte ‘entry-into-service’ (EIS) zoals aangekondigd door de vliegtuigbouwer; 2) Auro Aera Era is aangekondigd als elektrisch vliegtuig; alhoewel het een hybride element bevat wordt dit type als archetype elektrisch vliegtuig gebruikt in een positieve ontwikkelingsrichting; 3) Waterstof verbrandingsmotor (Internal Combustion Engine (ICE));

Appendix | Vliegtuigtechnologie

Er is een breed scala aan aangekondigde vliegtuigconcepten die uiteenlopen qua capaciteit, ontwikkeltijdslijn en maximale afstand

Overzicht van aangekondigde vliegtuigconcepten per technologie¹

Dikgedrukte voorbeelden zijn opgenomen in slide 5



Noot: 1) Aangekondigde vliegtuigconcepten op basis van plannen zoals gevonden op bedrijfswebsites

Appendix | Vliegtuigtechnologie

Op basis van de verwachte ontwikkeling van de aandrijftechnologieën en de huidige vluchtgegevens kan een inschatting gemaakt worden van de maximale toepassing bij gelijke capaciteit per vlucht

Maximale toepassing per technologie (% van # stoelkm) – bij gelijke capaciteit per vlucht ¹

Type	Max. beschikbare capaciteit	Max. afstand ²	Maximaal aantal stoelkm (en % van totaal)							
			<500 km		500 – 800km		800 – 2000 km		> 2000 km	
			# miljard	% van totaal	#	% van totaal	#	% van totaal	#	% van totaal
2025										
Elektrisch	2	500	-	-	-	-	-	-	-	-
Waterstof (brandstofcel)	2	1.500	-	-	-	-	-	-	-	-
Waterstof (verbranding)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hybride ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Totaal	555	13.484	2,32	100%	4,76	100%	19,25	100%	112,30	100%
2035										
Elektrisch	19	500	0,02	1%	-	-	-	-	-	-
Waterstof (brandstofcel)	40	1.850	0,03	1%	0,02	0,3%	0,03	0,1%	-	-
Waterstof (verbranding)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hybride	30	800	0,03	1%	0,02	0,3%	-	-	-	-
Totaal	555	13.484	1,86	100%	4,74	100%	22,91	100%	151,05	100%
2050										
Elektrisch	19	500	0,02	1%	-	-	-	-	-	-
Waterstof (brandstofcel)	80	2.000	0,28	15%	0,64	12%	0,81	3%	-	-
Waterstof (verbranding)	120	3.700	0,61	33%	1,55	29%	3,47	12%	0,06	<0,1%
Hybride	80	1.480	0,28	15%	0,64	12%	0,79	3%	-	-
Totaal	555	13.484	1,86	100%	5,42	100%	28,39	100%	208,88	100%

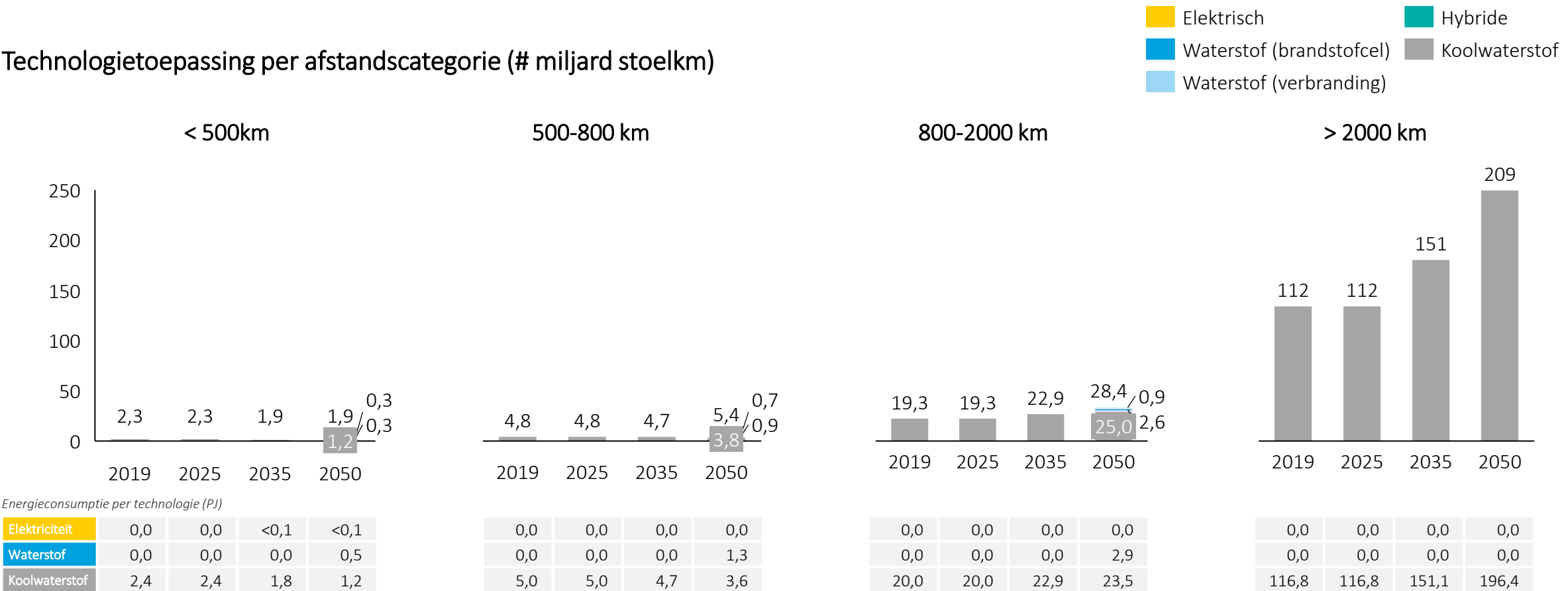
Noot: 1) Maximale toepassing van nieuwe vliegtuigtechnologie door te sommeren over alle vluchten die binnen de bandbreedte van capaciteit en maximale range van de vliegtuigtechnologie vallen. Hierbij is de aanname dat vraagontwikkeling evenredig is verdeeld over de vluchten binnen een afstandscategorie, en de capaciteit per vlucht constant blijft (aanname dat een vlucht die in 2019 met 100 stoelen werd gevlogen in de toekomst met dezelfde capaciteit bediend zal worden, en dat deze dus niet ingevuld zal worden met meerdere vluchten met minder capaciteit (ook gezien de wens om het aantal vliegbewegingen in Nederland te beperken)); 2) Maximale afstand op basis van aangekondigde vliegtuigconcepten, waarbij elektrisch is bijgesteld naar maximaal 500 kilometer en waterstof-brandstofcel in 2050 is bijgesteld naar 2.000 km; 3) Hoewel de eerste hybride vliegtuigen beschikbaar komen in 2025 (Ampaire Eco Caravan, 9-persoons) is de verwachting dat deze in 2025 nog niet commercieel toegepast zullen worden (op basis van Deloitte/To70 deskundig oordeel)

Bronnen: Eurocontrol 2019 vluchtdata

Appendix | Technologietoepassing

Omdat vliegtuigen met een nieuwe aandrijftechnologie een beperkte capaciteit en bereik hebben, is hun aandeel in het aantal stoelkilometers en energieconsumptie beperkt

Technologietoepassing per afstandscategorie (# miljard stoelkm)

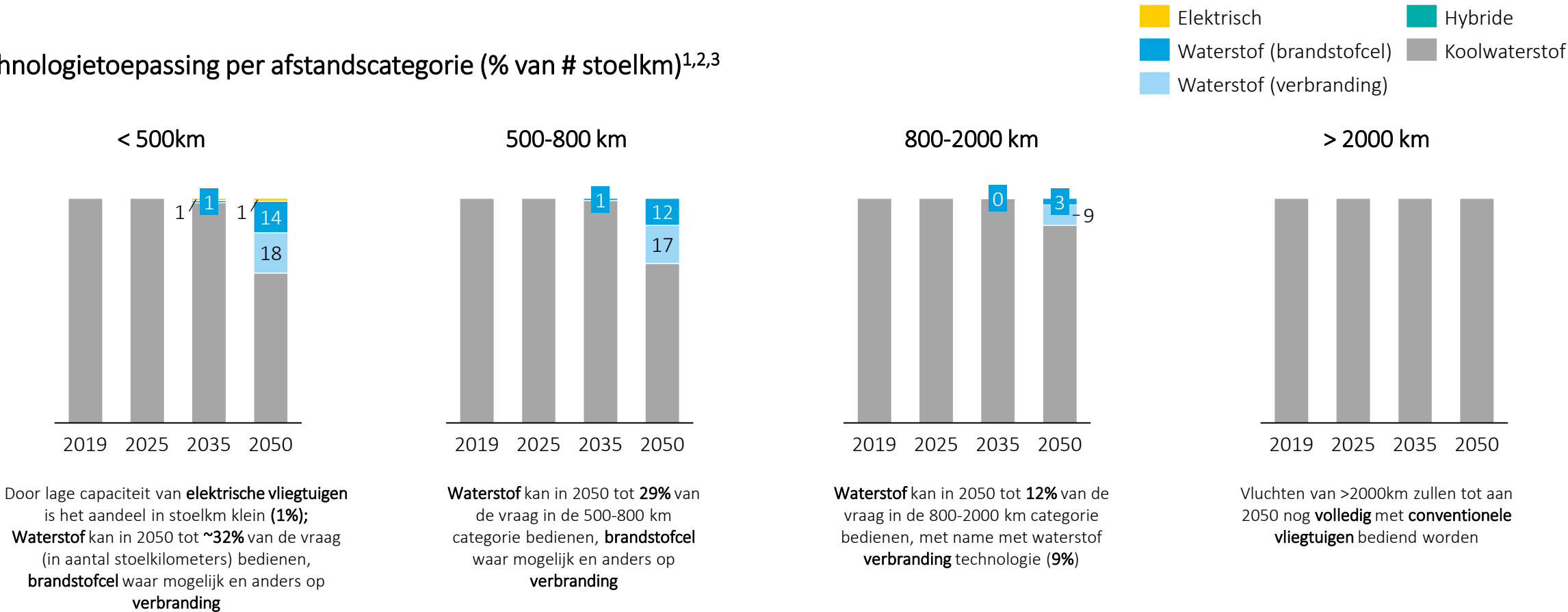


Op basis van de verwachte ontwikkeling van de technologietoepassing (% van het aantal stoelkm) per afstandscategorie, blijkt dat in elke afstandscategorie het aantal stoelkm dat bediend wordt met nieuwe aandrijftechnologieën zeer beperkt zal blijven

Appendix | Technologietoepassing

De adoptie van nieuwe technologie zal met name een rol spelen bij de korte afstandscategorieën

Technologietoepassing per afstandscategorie (% van # stoelkm)^{1,2,3}

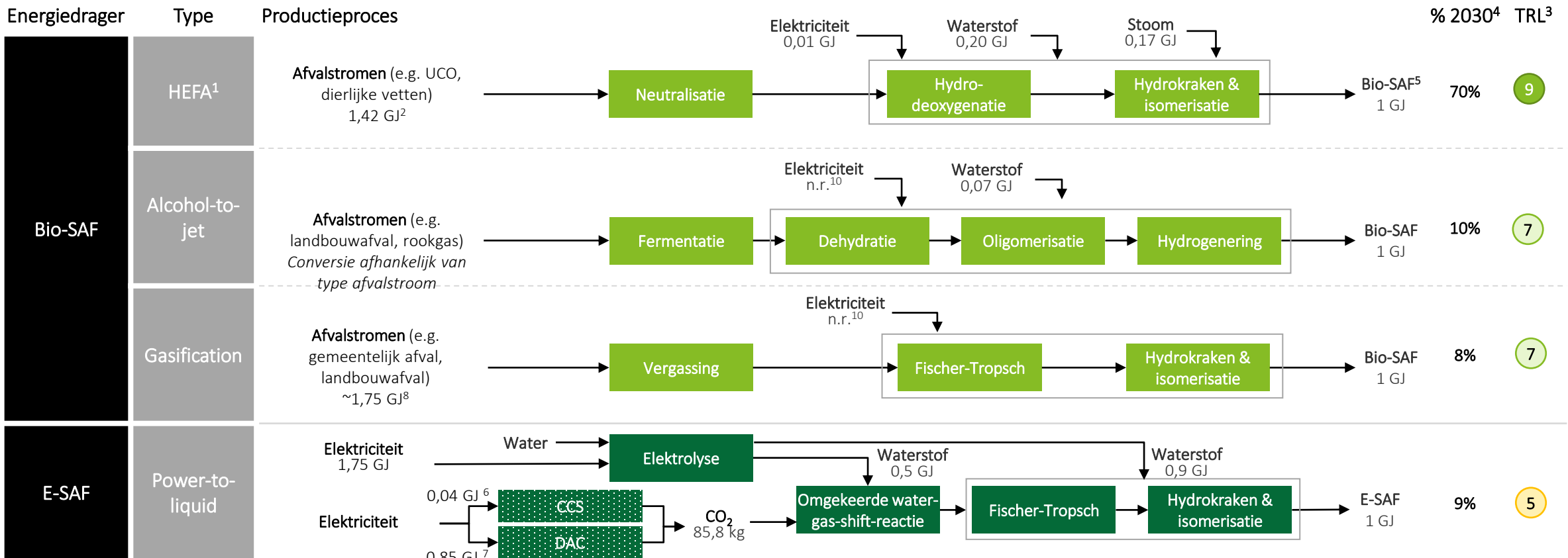


Noten: 1) Op basis van de maximale toepassing per technologie bij de aanname dat vluchten met dezelfde capaciteit bediend zullen worden (o.b.v. 2019 vluchtdata). Gekozen is voor de maximale toepassing (o.i.v. capaciteit en afstand), gegeven dat zelfs deze maximale toepassing beperkt is in vergelijking met de duurzaamheidsambities (bijv., AHEV (2022) ambitie van Zero Emission voor <500 km afstandscategorie, AZEA (2022) ambitie om de intra-Europese luchtvaart volledig emissievrij te krijgen in 2050 waarbij 50% van de reductie komt door nieuwe technologie (waterstof, hybride, elektriciteit)); 2) Gezien de beperkte toepasbaarheid van hybride vliegtuigen ten opzichte van waterstof vliegtuigen (op basis van maximale toepassing per technologie) en gezien de beperkte efficiëntie-winst van hybride ten opzichte van koolwaterstof-brandstoffen, is de verwachting dat waterstof als brandstof de voorkeur zal krijgen boven hybride vliegen; 3) Gezien de snellere verwachte ontwikkeling en de hogere efficiëntie van vliegtuigen op waterstof-brandstofcel ten opzichte van vliegtuigen met waterstof-verbranding, is de verwachting dat waterstof-brandstofcel de voorkeur krijgt boven waterstof-verbranding op vluchten waar dit mogelijk is (o.i.v. capaciteit en afstand);

Bronnen: AHEV (2022) 'Quantitative Analysis AHEV, Alliance for Zero Emission Aviation (AZEA) (2022) 'Factsheet – AZEA'; AZEA data van vliegtuigleveringen (2024); Studio Gear Up (2022) 'Hernieuwbare waterstof voor luchtvaartbrandstoffen in Nederland; To70/Deloitte analyse

Appendix | SAF-productie

Voor de koolwaterstof-brandstoffen zijn er twee duurzame alternatieve energiedragers; bio-SAF en e-SAF die op verschillende manieren kunnen worden geproduceerd



Noten: 1) Hydrotreated Esters and Fatty Acids (HEFA); 2) Voor het geval van 'pre-treated' Used Cooking Oil (UCO); 3) Technological readiness level (TRL) geeft op een schaal van 1-9 de mate van ontwikkeling van een technologie aan, waarbij TRL 1 staat voor technologie aan het begin van de ontwikkeling en TRL 9 voor technologie die technisch en commercieel gereed is (bron: RVO); 4) Op basis van Deloitte database van wereldwijde bedrijfsplannen ('company plans') en analyse van verwachte productiecapaciteit in 2030, 4% is overige technologie routes; 5) Naast bio-SAF wordt HVO, propaan en nafta geproduceerd, o.b.v. bron Studio Gear Up (2021) is hier uitgegaan van focus op maximale HEFA productie: 66% HEFA, 15% HVO, 10% nafta en 9% propaan; 6) Benodigde elektriciteit voor 85,8 kg CO₂ uit een puntbron (CCS) (bij bestaande CO₂-afvanginstallaties en gasvormig transport); 7) Benodigde elektriciteit voor 85,8 kg CO₂ o.b.v. Direct Air Capture (DAC); 8) Uitgaande van 'agricultural residues' (bron: ICCT (2021)); 9) Uitgaande van 'glycerine' (bron: ICCT (2024)); 10) Niet relevant (n.r.) aangezien de elektriciteitsconsumptie voor bio-SAF verwaarloosbaar klein zal zijn ten opzichte van de beschikbaarheid van elektriciteit

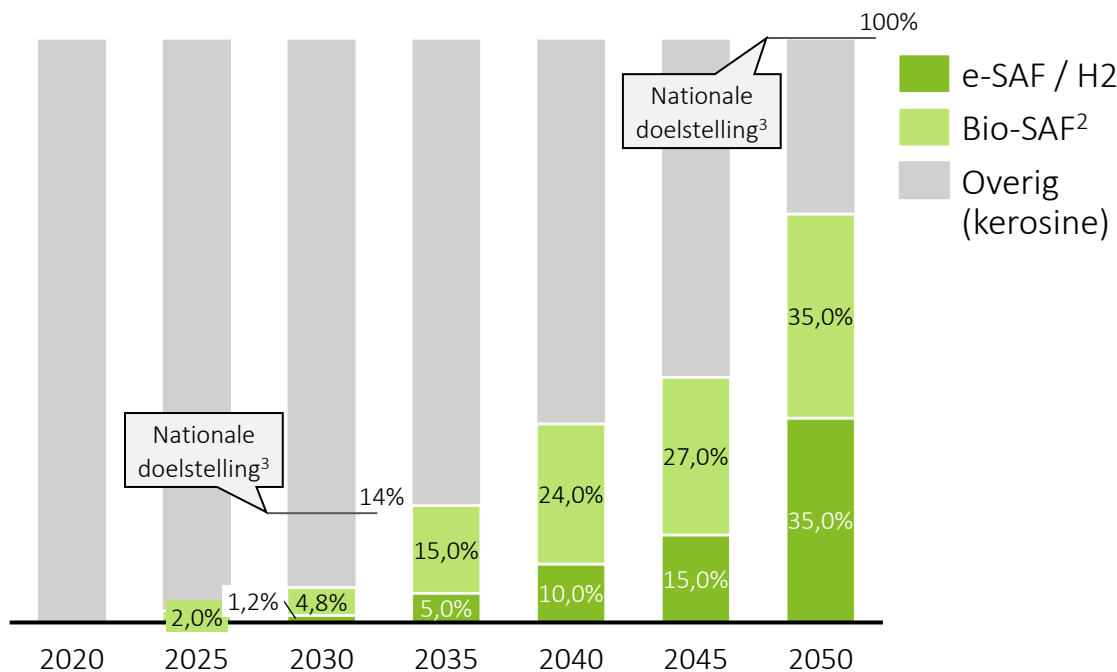
Bronnen: Studio Gear Up (2021) 'Conversion efficiencies of fuel pathways for Used Cooking Oil'; ICAO (2023) 'SAF conversion pathways', Kraan (2019) 'An Energy Transition That Relies Only on Technology Leads to a Bet on Solar Fuels', Studio Gear Up (2022) 'Hernieuwbare waterstof voor luchtvaartbrandstoffen in Nederland', PBL (2021) 'Conceptadvies SDE++ 2022 CO₂-afvang en -opslag (CCS)'; ICCT (2021) 'Estimating sustainable aviation fuel feedstock availability to meet growing European Union demand'; ICCT (2024) 'Availability of biomass feedstocks in the European Union to meet the 2035 ReFuelEU Aviation SAF target'

Appendix | Beleid

De toepassing van duurzame luchtvaartbrandstoffen wordt met name beïnvloed door de Europese bijmengverplichting

Beleidsontwikkelingen

ReFuelEU percentage duurzame luchtvaartbrandstoffen¹ (%)



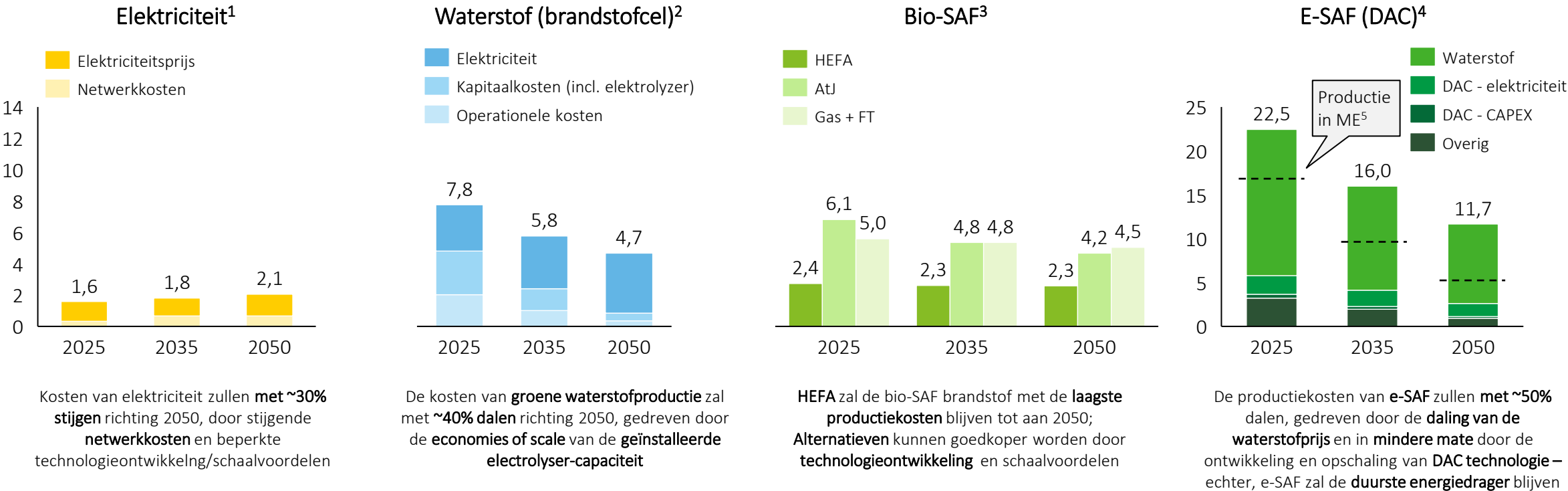
REFuelEU Aviation & RED III	Algemeen	• Alternatieve duurzame energiedrager moet voldoen aan minimum percentage broeikasgasemissiereductie t.o.v. kerosine (70% voor e-SAF en 65% voor bio-SAF⁵) • Verplichting ligt bij leveranciers en airlines
	e-SAF / waterstof	• Moet ofwel een RFNBO zijn (hernieuwbare waterstof, eventueel gecombineerd met koolstof (e-SAF), waarvan de energie-inhoud niet van biologische oorsprong kan zijn) ofwel synthetische 'low-carbon' aviation fuel waarbij de energie-inhoud niet-fossiel en niet-hernieuwbaar is en deze voldoet aan 70% emissiereductie (i.e., waterstof uit nucleaire elektriciteit)
	Bio-SAF	• Dient grotendeels (>97%) gemaakt te worden van grondstoffen die staan in Annex IX van REDIII (A en B); maximaal 3% uit andere bio-grondstoffen (maar exclusief voedsel- en veevoergewassen)
Selectie van overige relevante beleidsmaatregelen		• Luchtvaart in transitie; €383m Groeifonds⁴ • Vliegticketbelasting; €29,05/vlucht • Europese SAF-subsidie o.b.v. EU-ETS allowances • EU-ETS voor intra-EU vluchten • ETD: kerosinebelasting voor intra-EU vluchten

Noten: 1) Duurzame koolwaterstof-brandstoffen (SAF) of waterstof 2) SAF-verplichting wordt waarschijnlijk ingevuld door bio-SAF voor zover mogelijk tenzij er specifiek verplichting voor synthetische SAF is vanwege de verwachte kosten van bio-SAF vs e-SAF; 3) Nationale doelstelling uit Luchtvaartnota 2020 -2050; 4) Steunmaatregel 'Luchtvaart in transitie' komt ten goede aan de verduurzaming van de luchtvaart in brede zin (niet alleen SAF, maar ook duurzame vliegtuigontwikkeling en innovatie); 5) Betreft 'well-to-wing' emissiereductie
Bronnen: ReFuelEU Aviation – Oct '23; REDIII; Emissions Trading System aviation; Energy Taxation Directive; Luchtvaartnota 2020-2050 – Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat; NOW GmbH (2024) 'ReFuelEU Aviation Regulation', SkyNRG (2023) 'Disentangling ReFuelEU: How will it shape the SAF market?'

Appendix I Productiekosten

Ontwikkeling van productiekosten van energiedragers wordt bepaald door de verwachte technologie ontwikkeling en schaalvoordelen

Ontwikkeling van productiekosten van energiedragers (NL, €c per stoelkm)



Noten: 1) Elektriciteit op basis van wind-op-zee (TNO (2024) en PBL (2024)) inclusief netwerkkosten (bron: Aurora (2024)); 2) Op basis van de huidige kosten van groene waterstofproductie op basis van wind-op-zee (bron: TNO (2024)), de ontwikkeling van elk van de kostencomponenten (bronnen: Aurora (2024), PBL (2024)) en de energieconsumptie van waterstof-brandstofcel vliegtuigen (Bron: Studio Gear Up (2022)); 3) Op basis van prijsniveaus zoals geraamd in het Recardo-project (Europese Commissie 2020) en verkregen uit bron PBL & TNO (2024); 4) Op basis van 1,4 GJ benodigde groene waterstof per GJ e-SAF en 85,8 kg benodigde CO₂ per GJ e-SAF, gewonnen via Direct Air Capture (DAC), en kostencomponenten bepaald op basis van bronnen: Change Inc. (2024), CE Delft (2023), WKR (2024) voor DAC componenten en Kraan (2019) voor de overige kostencomponent; 5) Ter vergelijking, op basis van elektriciteitskosten in het Midden-Oosten ('Middle East' (ME)) van €31/MWh (bron: Deloitte analyse op BloombergNEF data uit 2019) voor waterstofproductie en DAC, geen netwerkkosten en gelijke andere kostencomponenten; Bronnen: TNO (2024) 'Evaluation of the levelised cost of hydrogen'; PBL (2024) 'Productie, import, transport en opslag van waterstof in Nederland'; PBL & TNO (2024) 'Klimaatneutrale Luchtvaart in 2050'; Kraan (2019) 'An Energy Transition That Relies Only on Technology Leads to a Bet on Solar Fuels'; Studio Gear Up (2022) 'Hernieuwbare waterstof voor luchtvaartbrandstoffen in Nederland'; Change Inc. (2024) 'Volgens Klimaatraad moet kabinet nú beleid maken om CO₂ uit de lucht te filteren'; CE Delft (2023) 'Koolstofverwijdering voor klimaatbeleid'; WKR (2024) 'Adviesrapport De lucht klaren?'; Aurora (2024) 'Grid fee outlook for the Netherlands 2045'; BloombergNEF; Deloitte analyse

Appendix | Productiekosten

De productiekosten van energiedragers worden bepaald door de kostencomponenten per energiedrager, waarbij de aannames intern consistent moeten zijn

Aannames voor kostencomponenten van energiedragers [1/2]

Energiedrager	Kostencomponent	Eenheid	Aanname			Onderbouwing	Bron
			2025	2035	2050		
Elektriciteit	Elektriciteit	€/MWh	75,00	68,50	83,50	- Op basis van wind-op-zee met 4.740-4.800 vollasturen per jaar - Voor 2025 op basis van TNO (2024) - Voor 2035 en 2050 op basis van PBL (2024) waarbij het gemiddelde is genomen tussen de lage en hoge variant (2030 den 2040) en waarbij is geïnterpoleerd en geëxtrapoleerd voor 2035 en 2050	TNO (2024) PBL (2024)
	Netwerk	€/MWh	20,00	40,00	40,00	Op basis van de netwerkkosten o.b.v ‘power demand’ (i.e., gemiddeld per jaar)	Aurora (2024)
Waterstof	Elektriciteit	€/kg	5,19	5,93	6,75	- Voor 2025 op basis van TNO (2024) - Voor 2035/2050 op basis van ontwikkeling van elektriciteitskosten (<i>zie elektriciteit</i>)	TNO (2024) <i>Zie elektriciteit</i>
	CAPEX	€/kg	4,92	2,46	0,87	- Voor 2025 op basis van TNO (2024) - Ontwikkeling na 2025 gebaseerd op ontwikkeling van investeringskosten uit PBL (2024) (-50% in 10 jaar (van 2030-2040))	TNO (2024) PBL (2024)
	OPEX	€/kg	3,58	1,79	0,63	- Voor 2025 op basis van TNO (2024) - Ontwikkeling na 2025 gebaseerd op ontwikkeling van vaste O&M (Operation and Maintenance) uit PBL (2024) (-50% in 10 jaar (van 2030-2040))	TNO (2024) PBL (2024)
Bio-SAF	HEFA	€/ton	1000	1000	1050	Op basis van PBL en TNO (2024), waarbij voor 2025 een gemiddelde waarde binnen de bandbreedte van 2020 is gekozen (rekening houdend met de trend richting 2030)	PBL en TNO (2024)
	ATJ	€/ton	2500	2050	1900		
	Gas+FT	€/ton	2050	2050	2050		
Kerosine	Kerosine	\$USD/liter	0,50	-	-	Huidige prijs op basis van IATA Jet Fuel Price Monitor (\$691 per ton in september 2024)	IATA (2024)

Appendix | Productiekosten

De productiekosten van energiedragers worden bepaald door de kostencomponenten per energiedrager, waarbij de aannames intern consistent moeten zijn

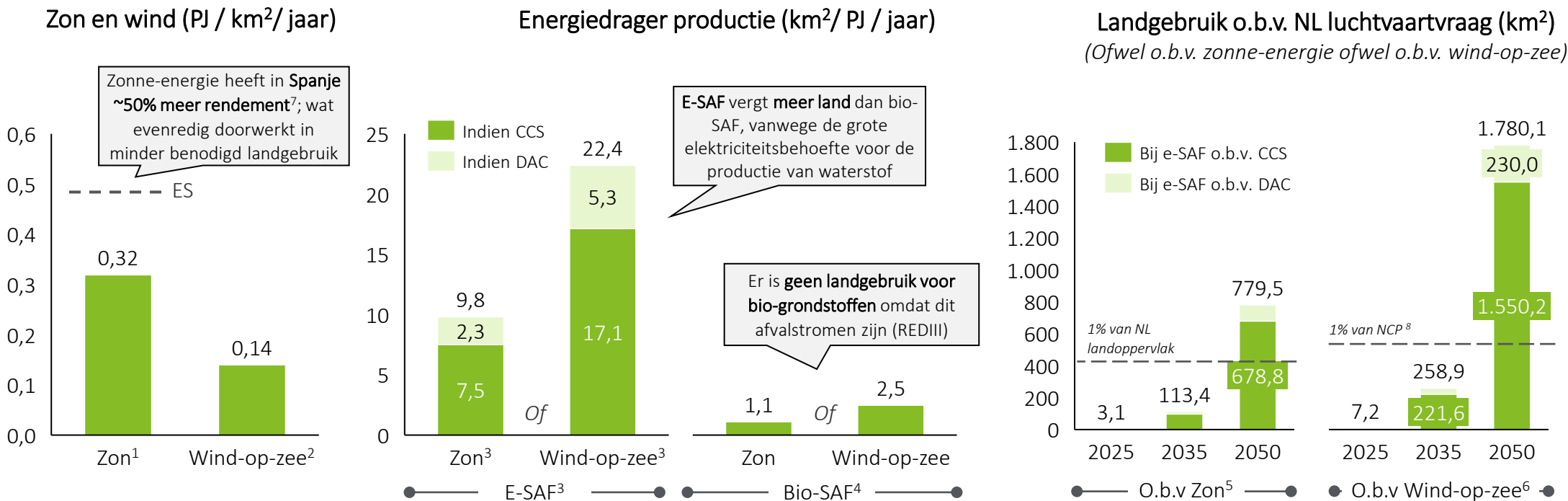
Aannames voor kostencomponenten van energiedragers [2/2]

Energiedrager	Kostencomponent	Eenheid	Aanname			Onderbouwing	Bron
			2025	2035	2050		
E-SAF	Waterstof	€/MJ e-SAF	0,16	0,12	0,10	- Op basis van de energetische verhouding van benodigde waterstof voor e-SAF (1,4 GJ : 1 GJ) - Kosten van waterstof per kg (<i>zie bij waterstof</i>) omgerekend naar €/MJ o.b.v factor 120 MJ/kg	TNO Kraan (2019) <i>Zie waterstof</i>
	DAC-elektriciteit	€/MJ e-SAF	0,02	0,02	0,02	- Op basis van verhouding van benodigde CO2 voor e-SAF (85,8 kg CO2 voor 1 GJ e-SAF) - Elektriciteitsverbruik per ton CO2: huidige is 2500 kWh, dalend naar 1500 kWh per ton in 2050 op inschatting van Carbyon (NL DAC producent) - Kosten van elektriciteit (<i>zie bij elektriciteit</i>)	Change Inc. (2022) Kraan (2019) <i>Zie elektriciteit</i>
	DAC CAPEX	€/MJ e-SAF	<0,01	<0,01	<0,01	- Op basis van verhouding van benodigde CO2 voor e-SAF (85,8 kg CO2 voor 1 GJ e-SAF) - Huidige CAPEX kosten per ton CO2 (€50 per ton) op basis van inschatting van Carbyon - Leercurve van een halvering van de kosten richting 2050	Change Inc. (2022) CE Delft (2023) Kraan (2019)
	CO2 uit CCS	€/MJ e-SAF	0,01	0,01	0,01	- Op basis van verhouding van benodigde CO2 voor e-SAF (85,8 kg CO2 voor 1 GJ e-SAF) - Prijs van €80/ton CO2, o.b.v bestaande CO₂-afvanginstallaties en gasvormig transport (gemiddelde van variant 1A en 1B uit PBL (2021)) – constant aangenomen over tijd) - Voor het geval van industriële CCS additionele CO2 kosten o.b.v. de ETS-prijs per ton CO2 opgeteld (€63/ton in 2024 en \$300/ton in 2050, geïnterpoleerd voor 2035); waarbij deze niet relevant is voor 2050 aangezien ETS-rechten in vanaf 2041 op 0 moeten staan	PBL (2021) Kraan (2019) Ember (2024) Shell & Deloitte (2021)
	Overig	€/MJ e-SAF	0,03	0,02	0,01	Op basis van verhouding (gedeelte overig van totaal) en ontwikkeling uit Kraan (2019), waarbij 'today' aangenomen is als 2025, 'target' als 2050 en voor 2035 is geïnterpoleerd	Kraan (2019)
	Waterstof (buitenland)	€/MJ e-SAF	RoEU: 0,12 RoW: 0,11	RoEU: 0,07 RoW: 0,06	RoEU: 0,04 RoW: 0,03	- Op basis van de 'levelized cost of electricity' in Spanje en de Verenigde Staten (respectievelijk: €35 en €23 per MWh) - Gelijke andere componenten van waterstofkosten (kapitaalkosten, O&M)	- Deloitte (2022) <i>Zie waterstof</i>
	DAC-elektriciteit (buitenland)	€/MJ e-SAF	RoEU: 0,01 RoW:<0,01	RoEU: 0,01 RoW:<0,01	RoEU: 0,01 RoW:<0,01	- Op basis van de 'levelized cost of electricity' in Spanje en de Verenigde Staten (respectievelijk: €35 en €23 per MWh) - Gelijke benodigde CO2 en elektriciteitsverbruik als in NL (<i>zie DAC-elektriciteit</i>)	- Deloitte (2022) <i>Zie DAC-elektriciteit</i>

Appendix I Landgebruik

Landgebruik voor productie van grondstoffen voor duurzame energiedragers (met name elektriciteit, o.a. voor waterstofproductie) is tussen de ~700-1800 km² in 2050

Landgebruik voor grondstoffen voor duurzame energiedragers



Noten: 1) Voor zonne-energie op basis van 192 km² grondgebruik en ingeschatte opbrengst van 17 TWh per jaar (bron: TKI Urban Energy (2021)); 2) Voor wind-op-zee op basis van 2.600 km² landgebruik voor vermogen van 21 GW (bron: Rijksoverheid/RVO) en uitgaande van 4.800 vollasturen (bron: TNO (2024)); 3) Landgebruik voor e-SAF in 2025 (landgebruik voor e-SAF met DAC wordt verwacht te dalen, aangezien de verwachting is dat de elektriciteitsbehoefte van DAC zal dalen); 4) Uitgaande van HEFA bio-SAF; 5) Bij volledig Nederlandse productie van energiedragers (e-SAF en bio-SAF), alle elektriciteitsbehoefte voorzien door middel van zonne-energie, e-SAF op basis van CCS, bij minimale hoeveelheid e-SAF o.b.v. ReFuelEU verplichting en bij invulling van overige SAF o.b.v. HEFA bio-SAF; 6) Bij volledig Nederlandse productie van energiedragers (e-SAF en bio-SAF), alle elektriciteitsbehoefte voorzien door middel van wind-op-zee, e-SAF op basis van CCS, bij minimale hoeveelheid e-SAF o.b.v. ReFuelEU verplichting en bij invulling van overige SAF o.b.v. HEFA bio-SAF; 7) Op basis van vergelijking van Robinsun van toepassing van Robinsun Performance 800 kit: opbrengst per jaar van 1,291 kWh in Madrid versus 840 kWh in Berlijn (+50%); 8) Het Nederlands Continentaal Plat (NCP) is het Nederlandse deel van de Noordzee (~57.800 km²)

Bronnen: TKI Urban Energy (2021) 'Ruimtelijk potentieel van zonnestroom in Nederland'; Rijksoverheid/RVO (Wind-op-zee.nl) 'Hoeveel ruimte gebruikt wind op zee'; TNO (2024) 'Evaluation of the levelised cost of hydrogen; Robinsun (2023) 'Spain's Solar Supremacy: A Radiant Revolution in Renewable Energy'

Appendix I Productieplannen

Op basis van de productieplannen zien we dat bijna 70% afhankelijk zal zijn van HEFA-technologie die met name UCO gebruikt

Top 15 geplande SAF productiefaciliteiten¹

SAF productiefaciliteit	Capaciteit (Mt/jaar)				Type ³	Grondstoffen
	Huidig	Gepland ²	Totaal	% van tot.		
Fidelis (Louisiana, USA)	0,00	1,77	1,77	5,9%	HEFA	Soybean, corn oil,...
Neste (Rotterdam, Netherlands)	0,00	1,20	1,20	4,0%	HEFA	Used cooking oils,...
Neste (Singapore)	1,00	0,00	1,00	3,3%	HEFA	Used cooking oils,...
Azure (Manitoba)	0,00	0,94	0,94	3,1%	HEFA	Canola, soybean, ...
World Energy (Paramount)	0,14	0,58	0,72	2,4%	HEFA	...
World Energy (Houston, US)	0,00	0,72	0,72	2,4%	HEFA	...
Summit Agricultural Group (US)	0,00	0,72	0,72	2,3%	AtJ	Corn, grains...
Diamond Green (Texas, US)	0,00	0,68	0,68	2,2%	HEFA	...
NXT Clean Fuels (Port Westward)	0,00	0,55	0,55	1,8%	HEFA	...
DG Fuels (Maine)	0,00	0,50	0,50	1,6%	Gasification	Wood waste, ...
Jiaao (Guanyun, Jiangsu)	0,50	0,00	0,50	1,6%	HEFA	...
Haike (Dongying, Shandong)	0,00	0,50	0,50	1,6%	HEFA	...
SK Energy (Ulsan)	0,00	0,50	0,50	1,6%	HEFA	...
SkyNRG (Amsterdam, NL) – on hold	0,00	0,50	0,50	1,6%	PtL	Biogenic CO ₂
HIF Global (Texas)	0,00	0,49	0,49	1,6%	PtL	Biogenic CO ₂
Top 15 totaal	1,64	9,15	10,79	36,1%		
Overig HEFA	1,48	10,27	11,75	39,3%		
Overig AtJ	0,03	2,29	2,32	7,8%		
Overig PtL	0,00	2,10	2,10	7,0%		
Overig Gasification	0,03	1,87	1,90	6,4%		
Overig (overige technologie)	0,20	0,86	1,06	3,5%		
Totaal	3,39	26,53	29,92	100%		

Meest gebruikte grondstoffen¹

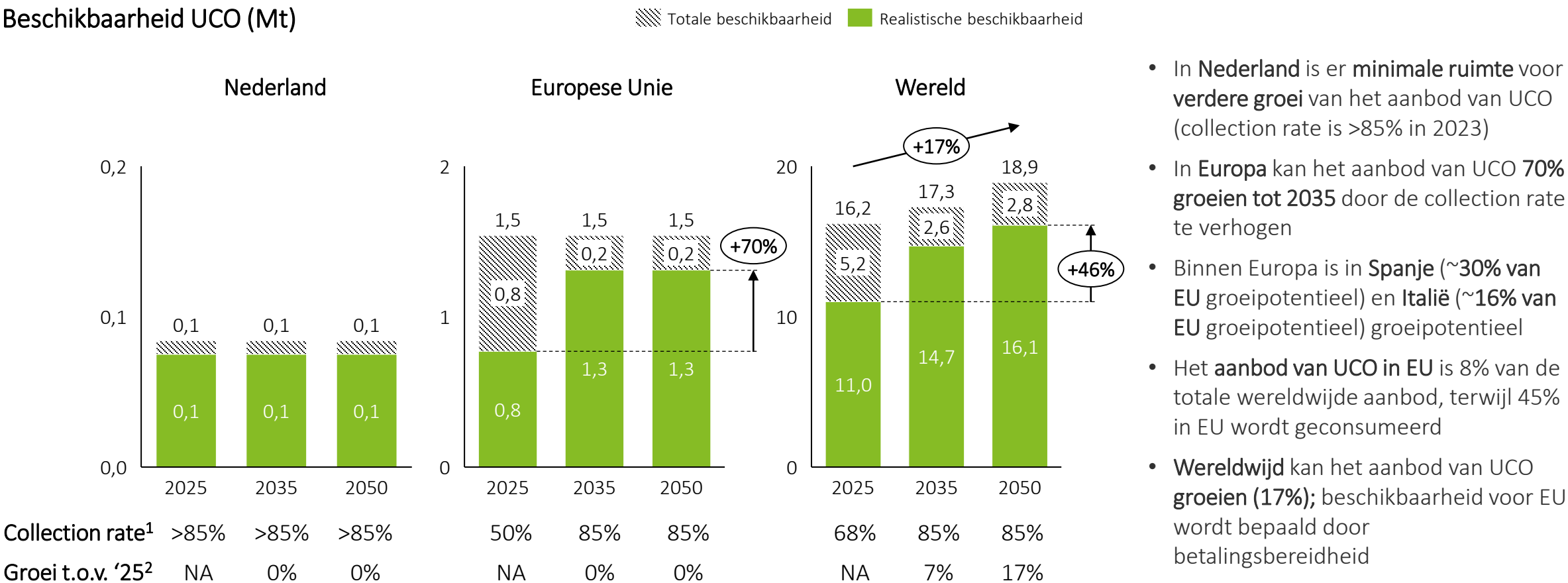
Productiemethode	% van totale capaciteit	Meest gebruikte grondstoffen ⁴	
		EU RED III Annex IX	Overige grondstoffen
HEFA	69,6	- Used cooking oils - Animal fat waste	- Soybean oils - Corn oil - Canola (rapeseed)
AtJ	10,1	- Agricultural waste - Non-agricultural waste (industrial / landfill / municipal solid waste (MSW))	- Sugarcane - Corn - Grains
Gasification	8,0	- Agricultural waste (e.g. wood waste, manure) - Non-agricultural waste (e.g. MSW, wastewater)	Vegetable oils
PtL	8,6		- Waterstof - CO₂
Overige technologie	3,6		
Totaal	100%		

Noten: 1) Op basis van totale capaciteit (som van huidig en gepland) uit Deloitte Company Plans database (juni 2022) aangevuld met laatste ontwikkelingen zover bekend wereldwijd t/m juli 2024; 2) Geplande capaciteit uit ofwel uitbreiding van huidige operationele productiefaciliteit of nieuwe geplande productiefaciliteit (typisch ~2030); 3) Hydrotreated Esters and Fatty Acids (HEFA), Alcohol-to-Jet (AtJ), Power-to-Liquid (PtL); 4) o.b.v top 5 grootste faciliteiten per methode
Bronnen: Deloitte Company Plans database, Deloitte analyse

Appendix I Grondstoffen beschikbaarheid

Wereldwijd kan het aanbod van UCO met bijna 50% groeien, maar dit zal voornamelijk gedreven zijn door groei buiten de EU; binnen de EU zijn Spanje en Italië belangrijke groeimarkten met 70% groeipotentieel

Beschikbaarheid UCO (Mt)



Noot: 1) De 'collection rate' is het gedeelte van de totaal beschikbare hoeveelheid UCO dat wordt opgehaald. Een maximale collection rate van 85% is aangenomen voor het bepalen van de toekomstige realistische beschikbaarheid; 2) De groei van de totale beschikbaarheid als percentage van de totale beschikbaarheid in 2025; 3) De jaarlijkse groeifactor van de totale beschikbaarheid is berekend op basis van de groei van 2025 tot 2035 (~0,6% per jaar), en deze is toegepast van 2035 tot 2050; Bronnen: Argus (2024) 'Webinar: the fight for feedstocks: UCO markets in 2024 and beyond', Transport & Environment (2024) 'European and US used cooking oil demand increasingly unsustainable – analysis'

Appendix I Waardeketen

De keuze voor lokale productie versus import wordt beïnvloed door overwegingen op het gebied van strategische autonomie, economische efficiëntie, stimulering van NL economie en mogelijkheden tot synergie

Overwegingen per waardeketen-optie

Optie	Strategische autonomie		Prijs (economische efficiëntie)		Stimulering van NL economie		Impact op landgebruik ²		Synergie-mogelijkheden		Relevantie per type			
											HEFA	Gas+ FT	AtJ	E-SAF
1 Volledig lokale productie	+	Kleinere afhankelijkheid van buitenland, en stabiele en betrouwbare levering van energiedragers	–	Hogere productiekosten, maar lagere transportkosten; mogelijke Economies of Scale (EoS) door vraag achterland (DE)	+	Lokale economische activiteit en banencreatie, en gebruik van bestaande Nederlandse infrastructuur en expertise	–	Significante impact, met name gezien de benodigde elektriciteit voor de productie van waterstof voor de productie van e-SAF	+	Mogelijkheid tot synergie van bio-SAF en e-SAF productie (bij gebruik van biogene CO ₂) ¹	+	+	+	~
2 Import van grondstoffen	~	Lokale productie van energiedrager, maar afhankelijkheid van buitenlandse grondstoffen	~	Lagere grondstofkosten zorgt voor lagere prijs; hogere transportkosten bij lage energiedichtheid; mogelijke EoS door vraag achterland	+	Lokale economische activiteit en banencreatie, en gebruik van bestaande Nederlandse infrastructuur en expertise	~	Land benodigd voor bio-SAF productie (incl. benodigde elektriciteit en waterstof) en opslag van grondstoffen en energiedragers	+	Mogelijkheid tot synergie van bio-SAF en e-SAF productie (bij gebruik van biogene CO ₂)	+	~	~	–
3 Import van halffabricaten	~	Afhankelijkheid van buitenlandse halffabricaten en grondstoffen, beperkt risicovol, enkel in geval van schaarste of crises	~	Lagere productiekosten zorgt voor lagere prijs, als transportkosten beperkt zijn; EoS door vraag achterland (DE) en andere sectoren	~	Enkel de vervaardiging van energiedrager uit halffabricaten in Nederland; mogelijke synergie voor gebruik andere sectoren	+	Beperkte hoeveelheid land benodigd voor elektriciteits- of waterstofproductie (enkel opslag van halffabricaten en energiedragers)	–	Beperkte mogelijkheid tot synergie gezien de biogene CO ₂ -uitstoot in het buitenland plaatsvindt	–	+	+	+
4 Import van energiedrager	–	Afhankelijkheid van buitenlandse productie en grondstoffen, risico in geval van schaarste of crises	+	Lagere productiekosten zorgt mogelijk voor lagere prijs, indien transportkosten beperkt zijn	–	Geen stimulering van Nederlandse economie; maar beperkt landgebruik	+	Beperkte impact op landgebruik (enkel opslag van energiedragers)	–	Geen mogelijkheid tot synergie	+	+	+	+

Noten: 1) Biogene CO₂ is een aantrekkelijke grondstof voor de productie van e-SAF aangezien hier geen emissierechten voor betaald hoeven te worden onder het EU Emissions Trading System (ETS); vandaar dat co-locatie van bio-SAF en e-SAF productiefaciliteiten tot synergie kan leiden waarbij de biogene CO₂ die vrijkomt bij de productie van bio-SAF als grondstof gebruikt wordt voor de productie van e-SAF (bij productie van 1 GJ bio-SAF komt 13,9 kg CO₂ vrij (op basis van 13,9 gram CO₂e/MJ voor HEFA-UCO (bron: ICCT (2023))), wat overeenkomt met 16% van de benodigde CO₂ voor de productie van 1 GJ e-SAF (zie productieproces slide)); 2) Betreft landgebruik voor elektriciteit en waterstof; geen landgebruik voor bio-grondstoffen omdat dit afvalstromen zijn (REDIII)
Bron: ICCT (2023) 'Meeting the SAF grand challenge: current and future measures to increase U.S. sustainable aviation fuel production capacity'



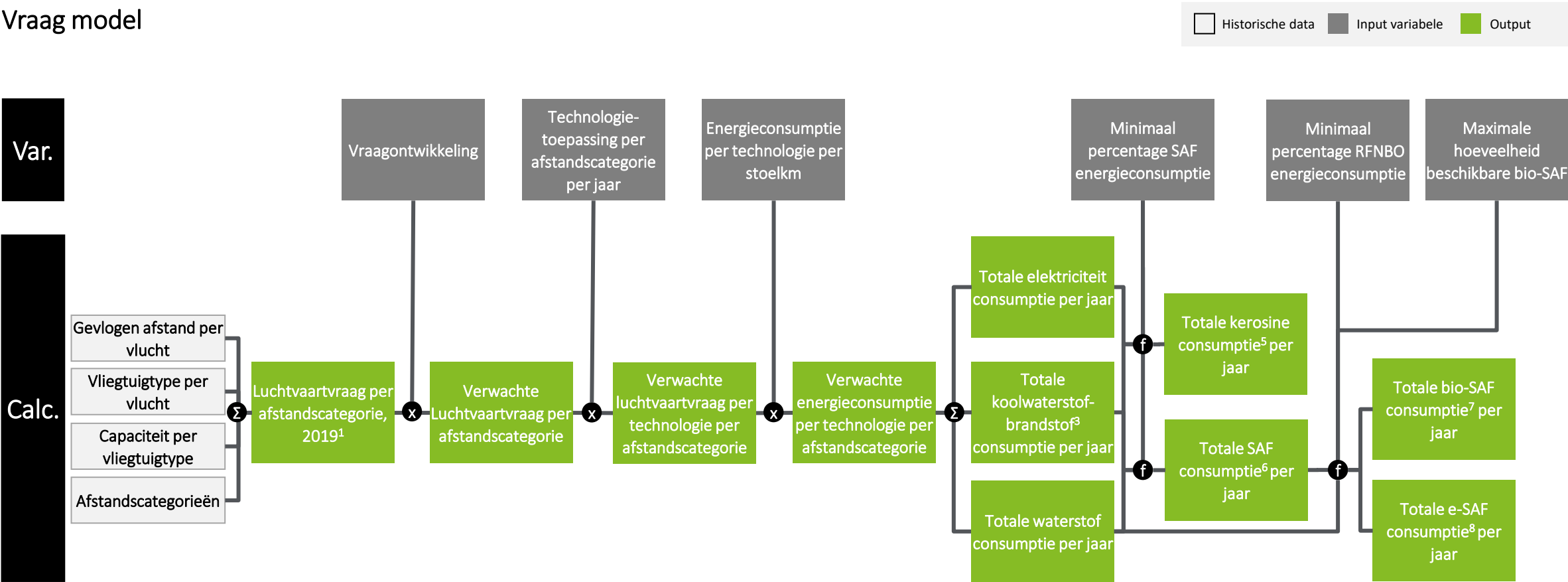
Appendix

Model beschrijving

Appendix | Modelbeschrijving

De verwachte energievraag per technologie wordt gemodelleerd op basis van de verwachte vraagontwikkeling, technologieontwikkeling en de beleidsmaatregelen

Vraag model

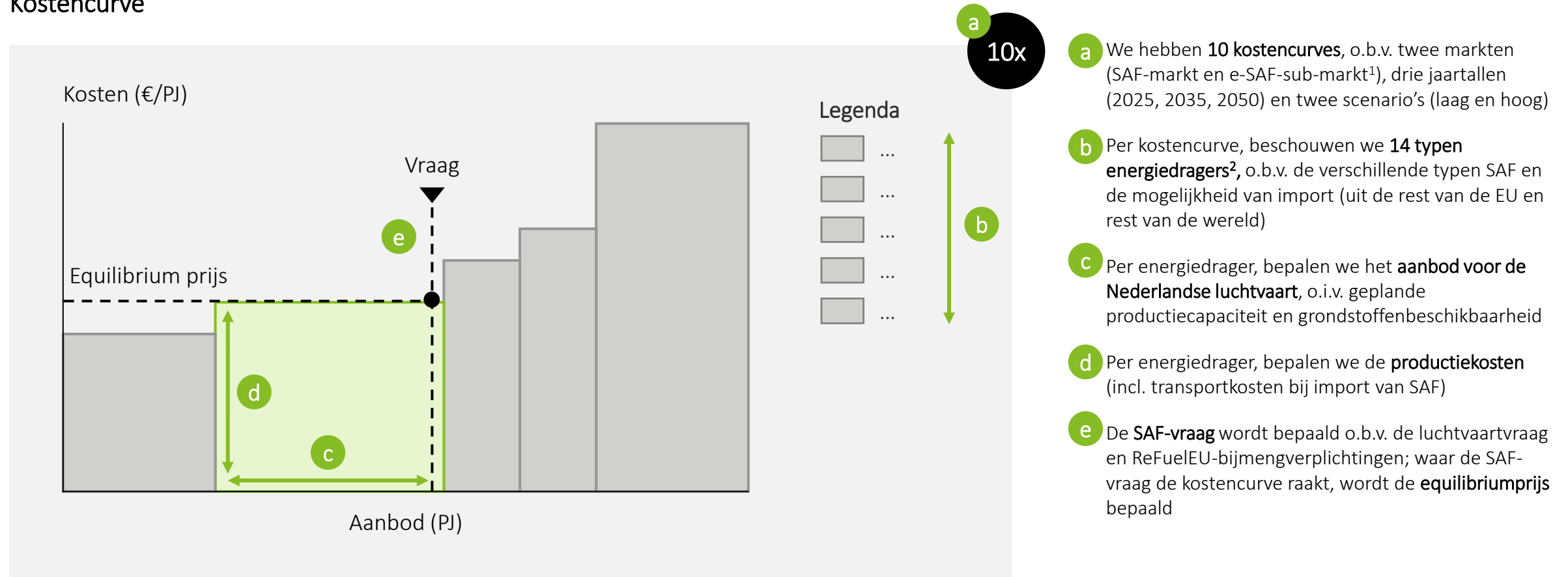


Noten: 1) De som van het aantal stoelkm per afstandscategorie over het aantal vluchten; 2) Het 'gewogen gemiddelde' refereert naar de gemiddelde vluchtafstand per vlucht naar rato van het aantal stoelen per vlucht; 3) Koolwaterstof-brandstoftechnologie bestaat uit kerosine, bio-SAF en e-SAF; 4) Energieconsumptie van hybride vliegtuigen is gedefinieerd als een som van aantal MJ elektriciteit per stoelkm en aantal MJ koolwaterstof-brandstof per stoelkm; 5) Totale kerosine consumptie is het deel van de totale energie consumptie (minus de energieconsumptie van elektrisch vliegen) dat niet SAF is (op basis van het SAF-verplichting); 6) Totale SAF-consumptie (som van waterstof, bio-SAF en e-SAF) is de minimale SAF energieconsumptie (als % van totale energieconsumptie minus de energieconsumptie van elektrisch vliegen) op basis van het SAF-verplichting; 7) Totale bio-SAF consumptie is het minimum van de totale SAF-consumptie minus de minimale RFNBO consumptie (op basis van het RFNBO verplichting) en de maximale beschikbare hoeveelheid bio-SAF; 8) Totale e-SAF consumptie is de minimale RFNBO consumptie (op basis van het RFNBO verplichting) minus de totale waterstof consumptie, plus de overige SAF consumptie in het geval van beperking door maximale hoeveelheid beschikbare bio-SAF

Appendix I Modelbeschrijving

Vraag en aanbod komen bij elkaar in een kostencurve, waarmee de invulling van de vraag wordt bepaald op basis van laagste productiekosten en het beschikbare aanbod per energiedrager

Kostencurve



Noten: 1) De e-SAF sub-markt zal ontstaan onder invloed van de ReFuelEU sub-verplichting voor synthetische luchtvaartbrandstof (e-SAF en waterstof) waarbij de vraag wordt bepaald door de totale vraag op basis van de sub-verplichting minus het gebruik van waterstof als energiedrager; 2) Typen energiedragers: HEFA uit NL, HEFA uit Rest van de EU (RoEU), HEFA uit de Rest van de Wereld (RoW), Gas + FT uit NL, Gas + FT uit RoEU, Gas + FT uit RoW, AtJ uit NL, AtJ uit RoEU, AtJ uit RoW, e-SAF op bio-CCS uit NL, e-SAF op industriële CCS uit NL, e-SAF op DAC uit NL, e-SAF uit RoEU, e-SAF uit RoW

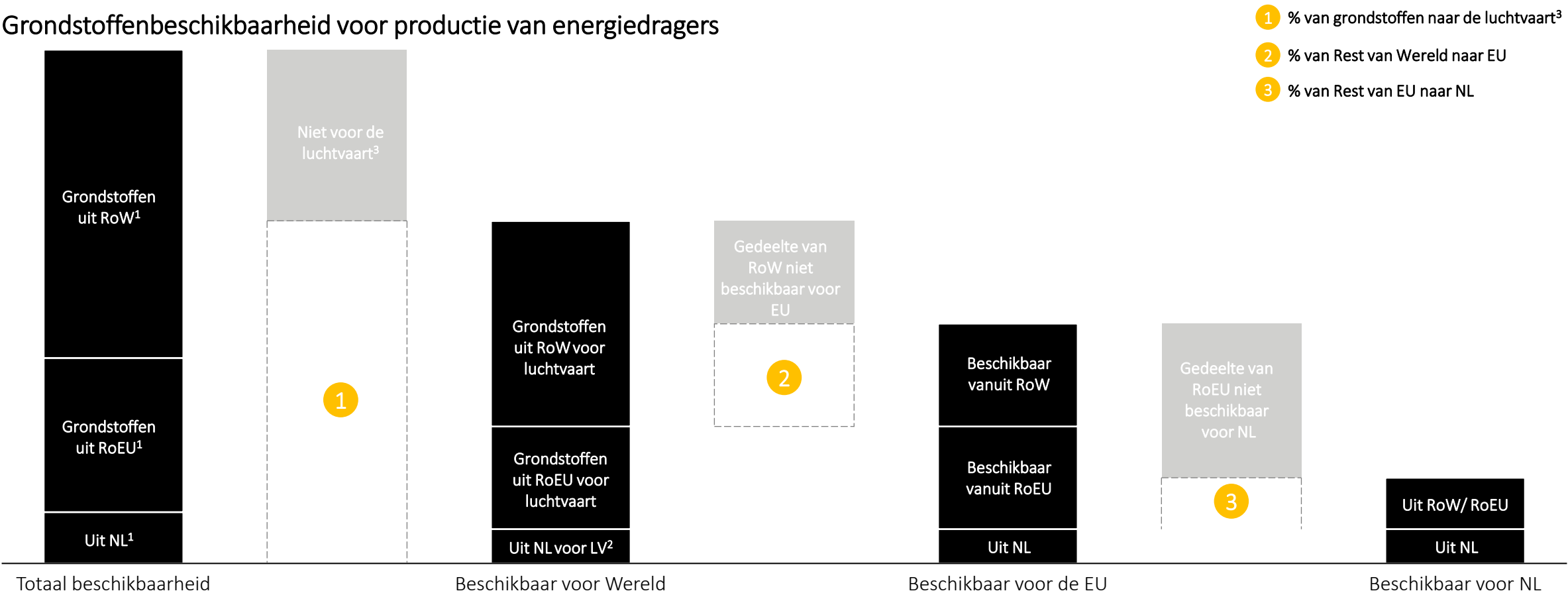
Appendix Scenario's



Appendix I Scenario's

De beschikbaarheid van grondstoffen voor de productie van energiedragers (wereldwijd, in EU en in NL) wordt berekend op basis van scenario's

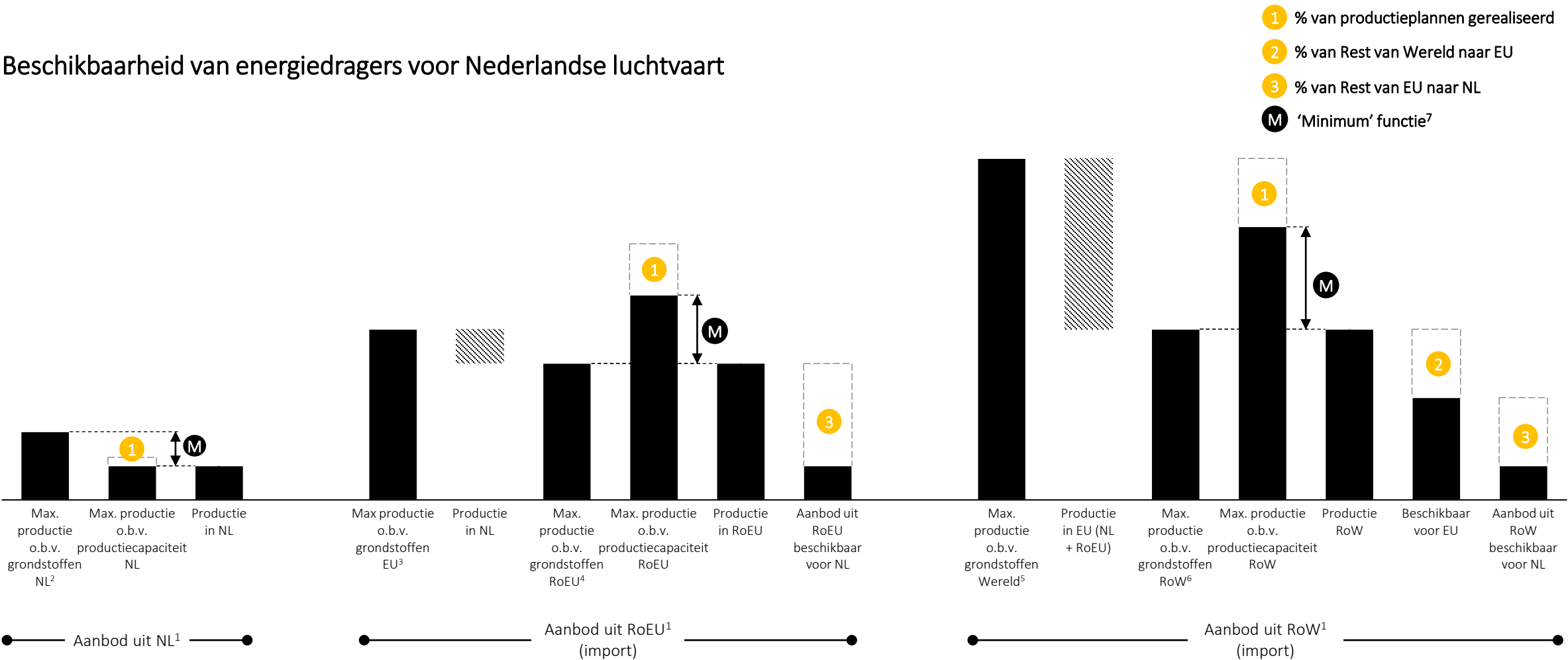
Grondstoffenbeschikbaarheid voor productie van energiedragers



Appendix I Scenario's

Vervolgens wordt de beschikbaarheid van energiedragers voor de NL luchtvaart bepaald, bestaande uit aanbod uit NL, aanbod uit RoEU en aanbod uit RoW, o.i.v. productiecapaciteit en grondstoffenbeschikbaarheid

Beschikbaarheid van energiedragers voor Nederlandse luchtvaart



Noten: 1) Nederland (NL), rest van de Europese Unie (RoEU), rest van de wereld (RoW); 2) Betreft grondstoffen die beschikbaar zijn voor Nederland (inclusief wat Nederland uit het buitenland kan halen); 3) Grondstoffen beschikbaar voor EU (incl. uit RoW); 4) Grondstoffen beschikbaar voor RoEU (incl. uit ongebruikt NL en uit RoW); 5) Wereldwijde grondstoffenbeschikbaarheid; 6) Beschikbaar voor de rest van de wereld (incl. ongebruikt uit EU); 7) Functie om de totale aanbod voor de luchtvaart (wereldwijd) te bepalen op basis van het minimum van de totale productiecapaciteit o.b.v. bedrijfsplannen en de maximale productie o.b.v. grondstoffenpotentieel

Appendix I Scenario's

De verwachte beschikbare grondstoffen in NL, EU en de wereld voor productie van energiedragers zijn bepaald op basis van onderzoek uit verschillende bronnen

Verwachte grondstoffenbeschikbaarheid in NL, EU en Wereld (PJ)

Type grondstoffen		Geografie	2025	2035	2050	Onderbouwing	Bron
Afvalstromen	UCO	NL	3,0	3,0	3,0	Op basis van huidige en toekomstige beschikbaarheid en collection rates, met de aanname dat de collection rate verhoogd kan worden tot maximaal 85%	- Argus (2024) - Transport & Environment (2024)
		EU	28,5	48,4	48,4		
		Wereld	407,0	543,9	595,0		
	Animal Fats ¹	NL	1,5	1,5	1,5	- Voor animal fats is de aanname dat de huidige beschikbaarheid in de EU en Nederland constant zal blijven richting 2050 - Agricultural waste bevat reststromen uit zowel landbouw als bosbouw met verschillende energiedichtheid; non-agricultural waste bestaat hoofdzakelijk uit Municipal Solid Waste - Beschikbaarheid van non-agricultural waste op basis van de aanname dat beschikbaarheid in EU en Nederland constant zal zijn richting 2050	- Argus (2024) - ICCT (2024) - Cerulogy (2023) - CE Delft (2020)
		EU	24,7	24,7	24,7		
		Wereld	722,0	798,0	912,0		
	Agricultural waste	NL	342,0	377,8	413,0		- CBS (2024) - ICCT (2024) - UNEP (2024)
		EU	16.100,0	21.050,0	17.300,0		
		Wereld	117.100,0	135.350,0	125.000,0		
	Non-agricultural waste	NL	109,2	109,2	109,2		NPE (2023)
		EU	804,0	804,0	804,0		
		Wereld	26.400,0	32.400,0	45.600,0		
	Elektriciteit	NL	214,0	691,0	1.314,0	Groei van hernieuwbare energie (wind en zon) op basis van de ambitie zoals bepaald in het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE, 2023)	
		EU	-	-	-		
		Wereld	-	-	-		
		NL	73,0	234,0	486,0		
		EU	-	-	-		
		Wereld	-	-	-		
Waterstof ²		NL	~0,0	207,0	~500,0	- Voor 2035 op basis van ambitie van Nederlandse overheid van 12 GW elektrolysecapaciteit in 2035 en 4800 vollasturen - Aanname dat waterstof niet geïmporteerd zal worden als grondstof voor de productie van luchtvaartbrandstoffen vanwege de conversieverliezen; import van eindproduct (e.g. e-SAF / bio-SAF) is voordeliger; aanname dat waterstofbeschikbaarheid niet restrictief is voor productiecapaciteit in het buitenland	- NPE (2023) - TNO (2024)
		EU	-	-	-		
		Wereld	-	-	-		

Noten: 1) Exclusief 'category 3 animal fats' (gezien het gebruik in voedselindustrie); 2) Uitgaande van voldoende beschikbaarheid van hernieuwbare elektriciteit voor de productie van waterstof (i.e., in 2035 wordt ~22% van de hernieuwbare elektriciteit gebruikt voor waterstofproductie, in 2050 wordt ~28% voor waterstof gebruikt)

Appendix I Scenario's

Per grondstof bepalen we de hoge en lage totale beschikbaarheid (voor NL, Rest van de EU en Rest van de wereld) dat beschikbaar is en dit vormt een restrictie op de productiecapaciteit

Scenario's voor grondstoffenbeschikbaarheid

Type grondstoffen		Scenario	2025			2035			2050			Onderbouwing	Bron
			% naar luchtvaart	% van Wereld naar EU	% van EU naar NL	% naar luchtvaart	% van Wereld naar EU	% van EU naar NL	% naar luchtvaart	% van Wereld naar EU	% van EU naar NL		
Afvalstromen	UCO ²	Hoog	16	41	10	100	100	7,5	100	100	7,5	• Verdeling van UCO in 2025 voor luchtvaart en verdeling van EU naar Nederland o.b.v historische data • Verwachting dat 70-100% van de UCO en animal fats gebruikt zal worden voor de luchtvaart gegeven de hoge betalingsbereidheid o.i.v. de ReFuelEU verplichting • Voor UCO en animal fats: in hoog scenario wordt zowel het Europees als het wereldwijde aanbod van evenredig verdeeld over de EU-lidstaten o.b.v. luchtvaartvraag (~7,5% naar NL); in laag scenario wordt alleen het Europees aanbod evenredig verdeeld onder EU landen en is er geen import van buiten EU • Voor (non-)agricultural waste: in hoog scenario gaat 50% van de beschikbaarheid naar de luchtvaart, in laag scenario gaan we uit van 10% als ondergrens	• Argus (2024) • Eurostat (2023)
		Laag	16	0	10	70	0	7,5	70	0	7,5		
	Animal Fats ³	Hoog	10	0	0	100	100	7,5	100	100	7,5		
		Laag	10	0	0	70	0	7,5	70	0	7,5		
	Agricultural waste	Hoog	10	-	-	50	-	-	50	-	-		
		Laag	10	-	-	10	-	-	10	-	-		
	Non-agricultural waste ⁴	Hoog	10	-	-	50	-	-	50	-	-		
		Laag	10	-	-	10	-	-	10	-	-		
Elektriciteit	Wind	Hoog	10	-	-	100	-	-	100	-	-	• In hoog scenario is er voldoende hernieuwbare energie beschikbaar om de vraag te dekken • In laag scenario wordt 10% van de beschikbare hernieuwbare elektriciteit gebruikt voor de luchtvaart (kerosineconsumptie in Nederland is ~10% van totale energieconsumptie in NL)	• CBS (2023)
		Laag	10	-	-	10	-	-	10	-	-		
	Zon	Hoog	10	-	-	100	-	-	100	-	-		
		Laag	10	-	-	10	-	-	10	-	-		
Waterstof		Hoog	10	-	-	90	-	-	90	-	-	• In hoog scenario wordt 90% van de beschikbare Nederlandse waterstof gebruikt voor de luchtvaart, gezien de relatief hoge betalingsbereidheid van de luchtvaart • In laag scenario wordt 10% van de beschikbare Nederlandse waterstof gebruikt voor de luchtvaart	
		Laag	10	-	-	10	-	-	10	-	-		

Appendix I Scenario's

Op basis van de bedrijfsplannen maken we een inschatting van de verwachte productiecapaciteit in NL, EU en de wereld

Aangenomen productiecapaciteit per energiedrager in NL, EU en wereld (PJ)

		Geografie	2025	2035	2050	Onderbouwing	Bron
Bio-SAF	HEFA ¹	NL	4,3	65,2	660,5	- Op basis van Deloitte Company Plans database, waarbij voor 2025 en 2035 is aangenomen dat alle bekende plannen (uitbreidingen en nieuwe faciliteiten) met opleverdatum voor respectievelijk 2025 en 2035 succesvol zijn voltooid - De ontwikkeling van de productiecapaciteit richting 2050, is dit op dit moment nog onzeker. In de analyse is aangenomen dat de jaarlijkse groei die verwacht wordt tot aan 2035 (~16%) op eenzelfde manier zal doorzetten tot aan 2050 (dit komt neer op een factor 10 schaal vergroting tussen 2035 en 2050) - Afhankelijk van beschikbare grondstoffen is het mogelijk dat tussen 2035 en 2050 de groei van HEFA kleiner is dan hier verwacht en in plaats daarvan meer AtJ en/of Gasification productiecapaciteit wordt ontwikkeld	Deloitte Company Plans Database
		EU	31,8	124,7	1.264,4		
		Wereld	249,4	891,7	9.039,0		
	AtJ	NL	0,0	0,0	0,0		
		EU	1,2	7,2	73,3		
		Wereld	2,5	130,0	1.317,4		
	Gasification	NL	0,0	2,6	26,0		
		EU	1,4	7,4	75,3		
		Wereld	11,7	103,0	1.043,5		
E-SAF ²		NL	0,0	1,5	123,8		
		EU	0,1	42,1	535,7		
		Wereld	0,1	99,8	1.120,1		
Elektriciteit		NL	287,0	925,0	1.800,0	Groei van hernieuwbare energie (wind en zon) op basis van Nationaal Plan Energiesysteem (2023)	NPE (2023)
		EU	-	-	-		
		Wereld	-	-	-		
Waterstof		NL	~0,0	207,0	~500,0	- Voor NL: voor 2035 o.b.v. 12 GW elektrolysecapaciteit en 4800 vollasturen - Aanname: Nederlandse beschikbaarheid van waterstof is meer dan voldoende voor direct gebruik als energiedrager (dus geen import)	NPE (2023)
		EU	-	-	-		
		Wereld	-	-	-		

Noten: 1) Exclusief de Shell HEFA productiefaciliteit in Rotterdam (staat 'on hold'); 2) Exclusief de SkyNRG Synkero productiefaciliteit (staat 'on hold')

Appendix I Scenario's

Na het bepalen van de energiedrager productie o.i.v. productiecapaciteit en grondstoffenbeschikbaarheid, verschilt ook de mogelijkheid van import van energiedragers in het lage en hoge scenario

Scenario's voor energiedrager beschikbaarheid voor de luchtvaart in Nederland

		Scenario	2025			2035			2050			Onderbouwing
			% van plannen	% van Wereld naar EU	% van EU naar NL	% van plannen	% van Wereld naar EU	% van EU naar NL	% van plannen	% van Wereld naar EU	% van EU naar NL	
Bio-SAF	HEFA	Hoog	100	80	7,5	120	80	7,5	-	-	-	- In laag scenario wordt het Europese aanbod evenredig verdeeld onder EU landen o.b.v. luchtvaartvraag (NL = ~7,5% van EU) en is er geen import van buiten de EU - In hoog scenario wordt het wereldwijde aanbod evenredig verdeeld over de EU-lidstaten - Productiecapaciteit in 2050 zal worden bepaald aan de hand van de benodigde productiecapaciteit om aan de vraag naar SAF o.b.v. overheidsbeleid te voldoen, gegeven de verwachting dat bij voldoende vraag de productiecapaciteit zal worden opgeschaald
		Laag	100	20	7,5	50	20	7,5	-	-	-	
	AtJ	Hoog	100	80	7,5	120	80	7,5	-	-	-	
		Laag	100	20	7,5	50	20	7,5	-	-	-	
	Gasification	Hoog	100	80	7,5	120	80	7,5	-	-	-	
		Laag	100	20	7,5	50	20	7,5	-	-	-	
E-SAF		Hoog	100	80	7,5	120	80	7,5	-	-	-	
		Laag	100	20	7,5	50	20	7,5	-	-	-	
Elektriciteit		Hoog	100	-	-	100	-	-	100	-	-	- In hoog scenario is er voldoende hernieuwbare energie beschikbaar om de vraag te dekken - In laag scenario wordt 10% van de beschikbare hernieuwbare elektriciteit gebruikt voor de luchtvaart
		Laag	100	-	-	100	-	-	100	-	-	
Waterstof		Hoog	100	-	-	100	-	-	100	-	-	- In hoog scenario wordt 90% van de beschikbare Nederlandse waterstof gebruikt voor de luchtvaart, gezien de relatief hoge betalingsbereidheid van de luchtvaart - In laag scenario wordt maar 10% van de beschikbare Nederlandse waterstof gebruikt voor de luchtvaart
		Laag	100	-	-	100	-	-	100	-	-	



Onder Deloitte wordt verstaan één of meer van Deloitte Touche Tohmatsu Limited (“DTTL” of “Deloitte Global”), haar wereldwijde netwerk van member firms en aan hen verbonden entiteiten (tezamen, de “Deloitte-organisatie”). DTTL en haar wereldwijde netwerk van member firms en aan hen verbonden entiteiten zijn juridisch gescheiden en onafhankelijke entiteiten, die elkaar niet kunnen verplichten of binden ten aanzien van derden. DTTL en iedere DTTL member firm en aan hen verbonden entiteiten zijn aansprakelijk voor hun eigen handelen en nalaten, en niet voor het handelen of nalaten van een andere entiteit. DTTL verleent geen diensten aan cliënten. Raadpleeg www.deloitte.com/about voor meer informatie.

Deloitte levert toonaangevende audit- en assurance-, belastingadvies- en juridische diensten, en diensten op het gebied van consulting, financial advisory, en risk advisory aan bijna 90% van de Fortune Global 500® en duizenden particuliere bedrijven. Onze professionals leveren meetbare en blijvende resultaten die het vertrouwen van het publiek in kapitaalmarkten helpen versterken, klanten in staat stellen te transformeren en bloeien, en de weg wijzen naar een sterkere economie, een meer rechtvaardige samenleving en een duurzame wereld. Voortbouwend op haar meer dan 175-jarige geschiedenis, omvat het bereik van Deloitte meer dan 150 landen en gebieden. Ontdek hoe de meer dan 415.000 mensen van Deloitte wereldwijd een impact maken die ertoe doet op www.deloitte.com.

Deze communicatie bevat louter algemene informatie en noch DTTL, noch haar wereldwijde netwerk van member firms of aan hen verbonden entiteiten verleent door middel van deze communicatie professioneel advies of diensten. Voordat u een beslissing neemt of actie onderneemt die van invloed kan zijn op uw financiën of uw bedrijf, dient u een gekwalificeerde professionele adviseur te raadplegen. Geen enkele entiteit in de Deloitte-organisatie is verantwoordelijk voor enig verlies dat wordt geleden door een persoon die op deze communicatie vertrouwt.