

De relevantie van de productie van synthetische kerosine op basis van CO₂ uit de buitenlucht voor de burgerluchtvaart
casestudy lijndienst: Amsterdam – New York

Eindhoven, 7 april 2021.

dr.ir.ing. Cees Blokhuisen

CV C. Blokhuisen

Sinds eind 1983 werkte hij in vele functies als hogeschooldocent bij de Fontys Hogeschool Engineering. Naast docent productietechniek en bedrijfskunde en later als hogeschooldocent onderzoeksmethodiek, integraal ontwerpen, was hij sinds 1985 intensief betrokken bij de curriculumontwikkeling en onderwijsherstructurering, ontwikkeling projectonderwijs en cursussen. Hij nam deel aan vele onderwijscommissies en was onder meer voorzitter van de Onderwijscommissie Werktuigbouwkunde, lid van de Studierichtingsleiding, vakgroepsvoorzitter, teamleider, Studierichtingsleider a.i. (directeur) van Studierichting Werktuigbouwkunde en voorzitter van de Medezeggenschapsraad. Landelijk was hij actief in de vorm van lezingen en workshops o.a. voor KiviNiria, AXIS - projectgroep, HBO-raad cluster Engineering en mede auteur van de landelijke competenties van de Bachelor of Engineering. Zijn lijst van interne/externe publicaties, reporten, notities, dictaten, werkboeken etc. telt meer dan 120 items. Enkele publicaties: Reisverslag (1978), De Landsspoorweg, een bedrijfskundige visie (1981), Werktuigbouwkunde in het Hoger Onderwijs, de Ingenieur als Integralist (1986), Ontwikkelingen in het HTO (1988), Hoger Onderwijs in de Werktuigbouwkunde (1991), Ingenieurs, Scholing en Onderwijscultuur (1998), Rapport Adviescommissie Gunsing (2004), Inhoud voor de Bachelor of Engineering, een set onderwijseenheden voor een curriculum voor de nieuwe Bachelor of Engineering, (2007)

In 1998 promoveerde hij aan de Universiteit Tilburg als sociaal wetenschapper op de cultuursociologische studie: Ingenieurs, Scholing en Onderwijscultuur binnen ingenieursscholen tezamen met Frans van Montfort. ("een vernieuwende en baanbrekende studie naar de betekenis van cultuur en kwaliteit voor de opleiding en vorming van ingenieurs" Tilburg University Press) Zijn promotoren waren de bestuurskundige prof.dr. Paul Frissen (Universiteit Tilburg) en de onderwijskundige prof.dr. Wynand Wijnen (Universiteit Maastricht),.

Slotbeschouwing als samenvatting:

De aanleiding van deze casestudy waren het Reuterbericht "*United Airlines invests in carbon-capture project to be 100% green by 2050.*" van 10 dec. 2020 en de korte informatiefilm van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Shell Holland, KLM en de Schiphol Groep onder de naam: "Dit is KLM's eerste duurzame synthetische kerosine vlucht" van 15 feb. 2021. In deze film wordt de "net zero aviation sector in 2050" en "sustainable aviation" aangekondigd. Het filmpje begint met het opstijgen van een vliegtuig gevuld met kerosine dat is bijgelengd met synthetisch kerosine en eindigt met een impressie van het vliegtuig boven een New York-achtige skyline. Vliegen op synthetische kerosine in de burgerluchtvaart kan en dat een luchtvaartmaatschappij investeert in carbon-capture (CO₂-captatie) om 100 % groen te worden heeft maatschappelijke betekenis.

Dit riep een aantal technology assessment vragen op over 'sustainable aviation', de 'net zero aviation' en '100% green aviation' in de burgerluchtvaart.

Om ons concreet voor ogen te stellen hoe en wat het betekent om nu '100 % green' te gaan vliegen, zoals zij ons voorhouden en beloven, vroegen wij ons af hoeveel synthetische kerosine er nodig is voor alleen de dagelijkse lijndienst: Amsterdam - New York, een fractie van de vliegbewegingen in de burgerluchtvaart. We nemen deze kerosinebehoefte als referentie omdat iedereen zich daarbij iets kan voorstellen.

Wij gaan, voor het gemak, verder uit van ideale theoretische omstandigheden en een paar eenvoudige natuurkundige principes: behoud van massa, 'energie uit niets' is niet mogelijk en van fysische randvoorwaarden aan productieprocessen, die blijven gelden ongeacht welke vage toekomstige beloftes over technologische innovatie dan ook. Bij concrete technologie sluiten we aan bij de op dit moment meest geavanceerde en industrieel gerealiseerde methanolproductie-installaties, CO₂-captatietechnologie en het grootschalige CO₂-captatie project in Texas, waar United Airlines haar doelstelling 'to be 100% green by 2050' aan ontleent. We gaan er in eerste instantie ook vanuit, dat vliegtuigen kunnen vliegen op synthetische kerosine, zodat we ons in eerste instantie kunnen richten op de energiebehoefte. Op dit moment kunnen, in de praktijk, vliegtuigen niet vliegen op alleen synthetische kerosine. Dat kunnen de motoren, pakkingen e.d. niet aan. Dit vraagt om een herontwerp van straalmotoren.

Uit CO₂ is, simpel gezegd, methanol te produceren en uit methanol synthetische kerosine. Een paar jaar geleden is de renewable methanolfabriek Georg Olah in Reykjanes in IJsland feestelijk in gebruik genomen. De fabriek maakt op economisch verantwoorde wijze methanol uit geothermische gassen met een hoog CO₂-gehalte afkomstig uit vulkanisch heet water.

Theoretisch benodigd minimaal aantal **Georg Olah synthetische methanolfabrieken** voor de energiebehoefte voor alleen het onderhouden van de lijndienst: Amsterdam - New York: 358 methanolfabrieken.

De synthetische methanolfabriek verwerkt gas met een hoog CO₂-gehalte. Haalt men de CO₂ niet uit de grondwater maar vangt men de CO₂ op uit de lucht via CO₂-captatie, dan heeft men daar aanvullend bij nodig een Direct Air Capture, een DAC installatie. Climeworks, wereldwijd vooruitlopend in de DAC-technologie, heeft een economisch verantwoorde DAC ontwikkeld en in 2017 succesvol in gebruik genomen.

Theoretisch benodigd minimaal aantal **Climeworks DAC's** voor de energiebehoefte voor alleen het onderhouden van de lijndienst: Amsterdam - New York: 2038 DAC's.

In 2022 bouwt Carbon Engineering een grootschalige en naar verwachting rendabele DAC in de desolate Permian Basin in Texas. De opgevangen CO₂ uit de buitenlucht wordt in de grond opgeslagen. De DAC bestaat uit 10 units met de unitsafmetingen van: 200 m lang, 20 hoog en 8 meter diep. Benodigd landoppervlak als de elektriciteit groen wordt opgewekt met zonne-energie: 58.6 km².

Theoretisch benodigd aantal **Carbon Engineering DAC's** voor de energiebehoefte voor alleen het onderhouden van de lijndienst: Amsterdam - New York: 2 DAC's.

De bouw van de 2 DAC's vergt een investering van zo'n 230 miljoen euro. Hierbij is nog geen rekening gehouden met de investering in de 'CO₂ tot kerosine fabriek', de kosten van het fabrieksterrein, de investeringskosten van de opwekking van duurzame niet fossiele energie, bijvoorbeeld zonne-energie en daarvoor benodigde landoppervlak (117,2 km²), de absorbents, de watervoorziening en de exploitatiekosten.

Voor de grootschalige verwerking van de CO₂ tot synthetische kerosine heeft INFRA Technology Group uit Houston grootschalige M 1000 Modular gas-to-liquids units ontwikkeld en gebouwd.

Theoretisch benodigd aantal **Infra M1000** voor de energiebehoefte voor alleen het onderhouden van de lijndienst: Amsterdam - New York: 13 units. Het netto fabrieksterrein daarvan is 1,16 hectare. Dit is exclusief de landbehoefte voor de opwekking van de benodigde groene elektriciteitsopwekking voor het Fischer-Tropsch proces, watervoorziening en infrastructuur.

De bovengenoemde installaties uit de procesindustrie voor een opgeschaalde captatie van CO₂ uit de buitenlucht voor de productie van de synthetische kerosine of voor opslag in de grond, veronderstellen een daarvoor geschikte transport- en infrastructuur. De exploitatie heeft ook andere gevolgen voor de omgeving. Denk aan de gangbare milieueisen voor procesindustrie die met giftige stoffen werkt en die verwerkt. Denk aan de belangen van omwonenden. De DAC stofzuigt CO₂ uit de lucht, maar loost CO₂ arme lucht. Studies naar plantengroei onder lucht met 180 ppm CO₂, iets minder dan de helft van de normale concentratie CO₂ laten al een vermindering van de groei van de plantenmassa zien van zo'n 65 %. Dit heeft direct gevolgen voor insecten, vogels, voor het ecosysteem van de directe omgeving. *"This region of local CO₂ depletion could have adverse effects on crop efficiency and the overall health of local habitats."* De theoretische CO₂ vrije luchtlaag van boomhoogte dik, die wordt geproduceerd voor alleen het instandhouden van de lijndienst in de burgerluchtvaart Amsterdam - New York heeft een groeisnelheid van 20,5 km². per uur. Daarmee zou theoretisch het Botlekgebied in 1,2 uur en heel Rotterdam in 15,8 uur te bedekken zijn.

Als de CO₂ uit de buitenlucht een te 'mijnen' grondstof is voor te verkopen kerosine dan is het een vraag wie dan de eigenaar van die buitenlucht is.

Vanuit de gedacht, het principe dat de vervuiler betaalt, kan men overwegen dat de totale kosten van de CO₂ captatie en bewerking van die CO₂ die vrijkomt in de buitenlucht bij het vliegen, ook door de burgerluchtvaart wordt opgebracht. Dat is daadwerkelijk 100 % groen maken of het net zero maken van de luchtvaart. Dat deze kosten dus niet worden afgewenteld op de maatschappij maar aan de luchtvaartmaatschappijen worden doorberekend. Hierdoor zou het vliegen in de burgerluchtvaart aanzienlijk duurder worden en een eind maken aan alle fun-vluchten. Beter nog: stoppen met straalmotoren en het aanleggen van landingsbanen voor de burgerluchtvaart; dit zou een voorbeeldige politieke wereldinspanning zijn.

Een Boeing 737-800 laten vliegen met 26.000 liter kerosine bijgelengd met 500 liter synthetische kerosine, minder dan 2 %, is een geheel ander experiment dan die Boeing te laten vliegen op kerosine waar 13.000 liter synthetische kerosine aan is toegevoegd. Het maken van en vliegen met deze 500 liter bijgelengde synthetisch kerosine is een klein streepje in de marge, een minuscuul stipje op een wijkende horizont van business as usual gebaseerd op groei en toenemende CO₂ uitstoot. "Dit is KLM's eerste duurzame synthetische kerosine vlucht" grenst asymptotisch aan mis-leiding.

Eindhoven, 7 april 2021.

dr.ir.ing. Cees Blokhuisen

Inhoud:	pagina
1. Inleiding, optiek en werkwijze	7
2. Procesgrootheden en kentallen	10
3. Productie van methanol voor de lijndienst: Amsterdam – New York Intermezzo: burgerluchtvaart 100 % groen, de opschaling van CO2 captatie	14
4. Grootschalige CO2 captatie en productie synthetische kerosine : voor de lijndienst Amsterdam – New York	20
Slotbeschouwing.	2

Inhoud vragenderwijs:

Procesgrootheden en kengetallen:

- Vraag: Hoeveel kerosine is er per dag nodig om de lijndienst: Amsterdam – New York te onderhouden?
- Vraag: Hoeveel kg synthetisch methanol is er dan minstens nodig voor een retourvlucht Amsterdam – New York?
- Vraag: Hoeveel liter methanol per retourvlucht Amsterdam – New York is er dan nodig?
- Vraag: Hoeveel liter methanol voor de lijndienst: Amsterdam – New York is er dan nodig?
- Vraag: Hoe werkt in principe de productie van methanol uit CO2 uit de buitenlucht?
- Vraag: Hoeveel kg methanol kan men theoretisch uit 1 kg CO2 halen?
- Vraag: Hoeveel kg CO2 heeft men nodig voor 1 liter methanol?
- Vraag: Hoeveel kg CO2 heeft men minstens nodig voor productie van 1 kg synthetische kerosine?
- Vraag: Hoeveel liter buitenlucht heeft men nodig voor 1kg CO2?

Productie van de benodigde CO2 en synthetische methanol:

- Vraag: Hoeveel **George Olah methanolfabrieken** (zie: figuur 3) heeft men ten minste nodig om de dagelijkse lijndienst: Amsterdam – New York te onderhouden?
- Vraag: Hoe lang kan één Boeing 747 op de totale methanolproductie per dag van deze Georg Olah methanolfabriek vliegen?
- Vraag: Hoe vangt men CO2 uit de buitenlucht en hoe werkt een DAC, Direct Air Capture van **Climeworks** (zie: figuur 6)?
- Vraag: Hoeveel Climeworks CO2 capturing installaties, DAC's, heeft men nodig voor CO2 capture uit de buitenlucht t.b.v. van de productie van de kerosine voor de lijndienst: Amsterdam - New York?
- Vraag: Hoe lang is dan de ventilatorwand van de DAC's, benodigd voor de productie van kerosine voor de lijndienst: Amsterdam - New York?

Grootschalige opschaling captatie van CO2 uit de buitenlucht:

- Vraag: Hoe groot is de capaciteit van de grootschalige **Carbon Engineering CO2 captatie unit** (zie: figuur 8) en plant uitgedrukt in kg kerosine?
- Vraag: Hoeveel Carbon Engineering DAC's heeft men minimaal nodig voor de kerosinebehoefte van de lijndienst: Amsterdam – New York?

Vraag: Hoe groot en duur is zo'n Carbon Engineering DAC plant dan?

Vraag: Hoe groot is het benodigde grondoppervlak voor de Carbon Engineering DAC?

Vraag: Hoe groot is dan het oppervlak van de CO₂ arme luchtlaag geproduceerd door de DAC's?

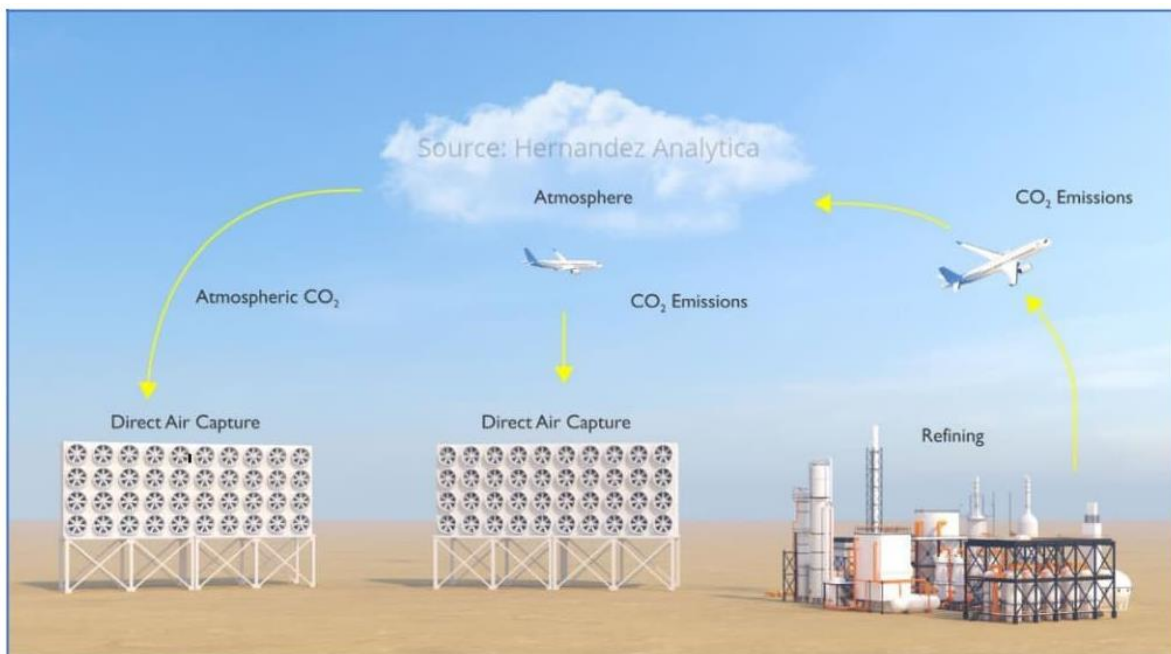
Vraag: Hoe groot moet de **Infra M1000** (zie: figuur 10) CO₂ opwerkfabriek minstens zijn voor de productie van de benodigde de synthetisch kerosine voor de lijndienst: Amsterdam – New York?

1. Inleiding, optiek en werkwijze

Een eerste aanleiding tot deze technology assessment benadering van synthetische kerosine voor de burgerluchtvaart is het Reuter-persbericht van 10 december 2020: "United Airlines invests in carbon-capture project to be 100% green by 2050.". United Airlines, een van de grootste vliegtuigmaatschappijen uit de burgerluchtvaart (ca 162,4 miljoen passagiers in 2019, 'in terms of enplaned passengers. Passenger numbers shown are inclusive of regional carriers operating under contract where applicable', https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_largest_airlines_in_North_America), investeert miljoenen dollars in een grootschalig project om CO₂ uit de lucht te vangen. CO₂ is om te zetten naar synthetische kerosine.

"The project, 1PointFive, is a partnership between Occidental Petroleum Corp subsidiary Oxy Low Carbon Ventures and Rusheen Capital Management that plans to build the first U.S. industrial-sized direct air capture plant that would permanently sequester 1 million tons of CO₂ each year."

De toekomstverwachtingen zijn groot, het ideaal is CO₂ neutraal vliegen in 2050. In de onderstaande figuur uit het artikel van Fernando C. Hernandez, die verder ingaat op dit project, staat afgebeeld hoe zo'n 'CO₂ kringloop' er dan uit ziet.



figuur 1: CO₂ neutraal, groen vliegen

Bron: Is This The Carbon Capture Technology Of The Future? Fernando C. Hernandez - Feb 10, 2021, (<https://oilprice.com/Latest-Energy-News/World-News/Is-This-The-Carbon-Capture-Technology-Of-The-Future.html>)

Een tweede aanleiding voor deze technology assessment beschouwing is de aankondiging van het Verkeerbureaus.info: "In Nederland is voor het eerst in de wereld een passagiersvlucht uitgevoerd door KLM waarbij het vliegtuig deels op duurzaam geproduceerde synthetische kerosine heeft gevlogen." (15 feb. 2021). Zij publiceren een korte film op YouTube.nl met de aansprekende titel : "Dit is KLM's eerste duurzame

synthetische kerosine vlucht". ([Dit is KLM's eerste duurzame synthetische kerosine vlucht - YouTube](https://www.youtube.com/watch?v=yk36todTVaY) , <https://www.youtube.com/watch?v=yk36todTVaY>)

In deze Engelstalige korte film, waarin expliciet verwezen wordt naar de deelnemende organisaties aan de High Level Conference on Synthetisch SAF, laten de makers de fabricagestappen zien van synthetische kerosine. We zien een Boeing 737-800 van KLM synthetische kerosine tanken uit een tankwagen van Shell en opstijgen bij Schiphol Airport. Aan het einde van het filmpje vliegt het vliegtuig over een New York achtige sky-line. SAF is Sustainable Aviation Fuel, een duurzame brandstof, een vervanging van de gangbare kerosine, gemaakt van bijvoorbeeld CO₂ uit de buitenlucht.

Deelnemers aan de Conferentie: *Cora van Nieuwenhuizen*, Minister of Infrastructure and Water Management, *Yuri Sebregts*, Executive Vice President Technology and Chief Technology Officer Shell, *Marjan van Loon*, President Director Shell Netherlands, *Pieter Elbers*, Chief Executive Officer KLM Royal Dutch Airlines en *Dick Benschop*, President and Chief Executive Officer at Royal Schiphol Group, geven acte de préséance met statements over deze gebeurtenis en markeren een historisch feit. Zij schetsen toekomstperspectieven over "sustainable aviation" in 2050. Shell schetst het toekomstbeeld van klimaat neutraal vliegen op basis van gerecycled CO₂. KLM zegt dat tegen 2030 al, 14% van alle vluchten vanaf Schiphol "are fueled with sustainable fuel". Royal Schiphol Group proclameert de "net zero aviation sector in 2050" en "to get rid of the carbon". De crux van het filmpje is, dat het Shell gelukt is om 500 liter synthetische kerosine te produceren uit CO₂ uit de atmosfeer en industrieel gas en deze 500 liter bij te mengen bij de gebruikelijke fossiele kerosine van die Boeing 737-800, die opstijgt vanaf Schiphol. Dit is KLM's eerste duurzame synthetische kerosine vlucht, zoals zij zelf zeggen en een wereldprimeur in de burgerluchtvaart.

Het staat buiten discussie dat de burgerluchtvaart een grootgebruiker is van fossiele kerosine en ook een duidelijk zichtbaar producent van de uitstoot van CO₂. Immers het kerosinegebruik van de luchtvaart in 2019 wordt geschat op 315.000.000.000 kg.

Dit roept technology assessmentvragen op over de reikwijdte van de productie van synthetische kerosine uit CO₂. Vragen over de mogelijkheden tot opschaling van de productie en de gevolgen van grootschalige productie. De opschaling van de CO₂ winning uit buitenlucht kent immers twee vormen: grotere installaties of units (scaling up) en het toepassen van een groot aantal eenheden of units (scaling out). Opschaling loopt onherroepelijk op tegen natuurkundige grenzen, omgevingsgrenzen en politieke en maatschappelijke haalbaarheid.

Simpel gezegd, er zijn meerdere wegen, doorloopt het proces van de productie van synthetische kerosine uit koolzuurgas CO₂ uit de buitenlucht schematisch de volgende productiestappen:

1. afvangen van CO₂ uit de buitenlucht,
2. CO₂ opwerken tot methanol,
3. methanol opwerken tot kerosine.

Om een tastbeeld en enige grip te krijgen op de relevantie van de productie van synthetische kerosine op basis van CO₂ uit de buitenlucht voor de burgerluchtvaart, hanteren we voor het gemak vragenderwijs een eenvoudig gedachte-experiment. Wij

houden het zo simpel mogelijk en gaan uit van ideale chemische en technologische processen. En, wij gaan daarbij ook uit van de daadwerkelijke praktijk en de toegepaste state of the art technology.

Als referentie nemen wij, op het idee gebracht door de bovengenoemde korte film, de vlucht van een Boeing 747 van Schiphol naar New York. Dit doen we om gevoel te krijgen voor de reikwijdte en omvang van de benodigde productiefabrieken en het voor ogen houden van waar we het over hebben. Meer precies, we nemen de dagelijkse lijndienst: Amsterdam - New York in de burgerluchtvaart als referentie voor de energiebehoefte en het kerosineverbruik. Deze lijndienst is natuurlijk een fractie van de burgerluchtvaart-bewegingen vanuit alleen al Schiphol.

Zo krijgen we een tastbaar beeld van de omvang van de benodigde technologie en installaties om aan de CO₂-behoefte uit de buitenlucht en aan de productiecapaciteit om aan de vraag aan synthetische kerosine te voldoen. Zo kunnen we de betekenis van synthetische kerosineproductie en sustainable vliegen binnen de Nederlandse context beter duiden.

Onze benaderingswijze is vragenderwijs. Stap voor stap en zo eenvoudig mogelijk berekenen we de grootheden die we nodig hebben om voor de productieprocessen, de minimaal benodigde omvang en de aantallen installaties te kunnen inschatten en vergelijken. Technologische en natuurkundige voorkennis is niet echt nodig, die doen we gaande weg op.

De productieketen van synthetische kerosine gaat grofweg van CO₂ opvang naar methanol naar kerosine, wij volgen de keten teruguit: van de behoefte aan kerosine naar methanol naar de benodigde CO₂, dus

- a. van de behoefte aan kerosine naar de behoefte aan methanol,
- b. van de behoefte aan methanol naar de productie van methanol,
- c. van de productie van methanol naar de behoefte aan CO₂ uit buitenlucht,
- d. van de behoefte van CO₂ naar de productie van CO₂ uit de buitenlucht.

Wij ontkomen er dus niet aan om een aantal rekengrootheden en schematische processen te introduceren om onze bevindingen en vergelijkingen in grootheden en getallen uit te kunnen drukken. Omdat het hier om globale vergelijkingen gaat, zijn het aantal significante cijfers in de getallen hooguit drie en voldoende nauwkeurig.

De hiernavolgende tekst heeft drie delen en de slotbeschouwing:

Procesgrootheden en kentallen,

Productie van methanol, CO₂ captatie en synthetische kerosine
voor de lijndienst: Amsterdam – New York,

Grootschalige CO₂ captatie en productie synthetische kerosine
voor de lijndienst: Amsterdam – New York,

Slotbeschouwing.

2. Procesgrootheden en kentallen

Vraag: Hoeveel kerosine is er per dag nodig om de lijndienst: Amsterdam – New York te onderhouden?

Als referentie voor kerosinebehoefte in de burgerluchtvaart nemen we, zoals gezegd, de kerosinebehoefte van de lijndienst: Amsterdam - New York. Dit is slechts een kleine fractie van de energiebehoefte van de burgerluchtvaart.

Een retourvlucht: Amsterdam - New York (ca. 11.000 km) met een Boeing 747 verbruikt circa: 120.000 kg kerosine. Het aantal vluchten Amsterdam - New York is ongeveer 27 per dag ofwel ongeveer 13,5 retourvluchten per dag. Een retourvlucht is ongeveer 15 uur vliegen. De kerosine behoefte is dan ca.: $13,5 \times 120.000 = 1.620.000$ kg per dag.

Vraag: Hoeveel kg methanol is er dan nodig voor een retourvlucht: Amsterdam – New York?

Soortelijk gewicht kerosine = 0,79 kg / liter, verbrandingswaarde: 12 kWh / kg.

Soortelijk gewicht methanol = 0,791 kg / liter, verbrandingswaarde: 5 kWh / kg. (<https://nl.wikipedia.org/wiki/Energiedichtheid>)

Wij gaan ervan uit dat we dezelfde hoeveelheid energie, ongeacht de soort brandstof, nodig hebben om te vliegen dus zal de energie-inhoud van de synthetisch methanol even groot moeten zijn als de energie-inhoud van de verbruikte kerosine.

De energie-inhoud 1 kg kerosine is 12 kWh / 5 kWh = 2,4 zo groot als de energie-inhoud van 1 kg methanol. Dus voor een retourvlucht Amsterdam – New York is nodig: $120.000 \times 2,4 = 288.000$ kg methanol.

Een terzijde, merk op:

1 liter methanol weegt ongeveer evenveel als 1 liter kerosine. Maar de energie-inhoud van kerosine is 2,4 keer zo groot als die van methanol. Vandaar dat vliegtuigen vliegen op kerosine in plaats van methanol. (zie ook: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Energiedichtheid>)

Zou een Boeing 747 vliegen op alleen methanol, wat voor de motoren problematisch is, dan zou de Boeing zonder tussenlanding, geen 120.000 kg maar 288.000 kg aan brandstof moeten meenemen. Dat is 148.000 kg meer. Het maximum startgewicht van een Boeing 747 is 333.400 kg. (zie ook: https://nl.wikipedia.org/wiki/Boeing_747) Leeggewicht van de Boeing is 162.400 kg. Een Boeing 747 zou, zonder vracht en of passagiers, al niet eens van de grond loskomen... Ter vergelijking elektrisch vliegen: de beste recentste Tesla-batterij heeft een energie-inhoud van 0,25 kWh / kg. Stel een nog te ontwikkelen superaccu van 1 kWh / kg voor. Dan is de zwaarte van de benodigde accu's voor deze Boeing alleen al: $12 \times 120.000 = 1.400.000$ kg ofwel het maximale vrachtvermogen van meer dan 8 van die Boeings. Kerosine is een goede 'accu voor energie'

Vraag: Hoeveel liter methanol per retourvlucht: Amsterdam – New York is er dan nodig?

De dichtheid van methanol is 0,791 kg / liter.

Ofwel 1 kg methanol: $1 / 0,791 = 1,264$ liter methanol. Nodig: 288.000 kg methanol per retourvlucht, dat is $288.000 \times 1,264 = 364.000$ liter methanol per retourvlucht.

Vraag: Hoeveel liter methanol voor de lijndienst: Amsterdam – New York is er dan nodig?

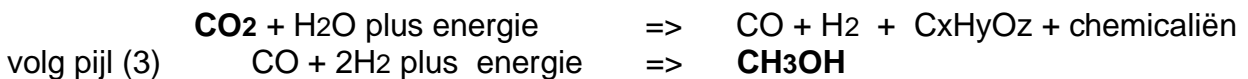
De lijndienst heeft ongeveer 13,5 retourvluchten per dag.
 Daarvoor is nodig: $13,5 \times 364.000 = 4.914.000$ liter methanol per dag.

Vraag: Hoe werkt in principe de productie van methanol uit CO₂ uit de buitenlucht?

Zoals gezegd, kan synthetische kerosine worden gemaakt van renewable methanol (RM) en deze methanol wordt gemaakt van opgevangen koolzuurgas CO₂ uit de buitenlucht. In onderstaande figuur 2 staat schematisch afgebeeld hoe uit CO₂ uit de buitenlucht methanol gemaakt kan worden.

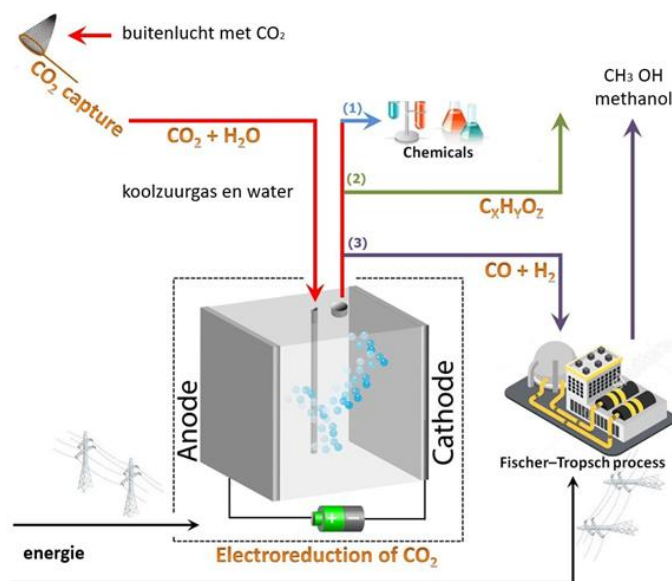
H = waterstof, O = zuurstof, C = koolstof en energie = elektrische energie.
 chemische samenstelling: water = H₂O koolzuurgas = CO₂ methanol = CH₃OH
 koolmonoxide = CO

Voor de productie van synthetische methanol CH₃OH heb je de koolstof C uit de CO₂ uit de buitenlucht nodig. Volg de rode pijl bovenin figuur 2 na de CO₂ captatie (opvang).



Merk op:

Je hebt dus **minstens** 1 molecuul CO₂ nodig voor de productie van 1 molecuul methanol CH₃OH, want de atoom C zit één keer in de CO₂ en ook één keer in de methanol CH₃OH.



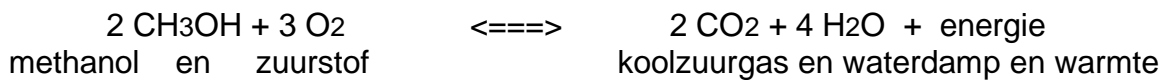
figuur 2: productieproces synthetische methanol uit CO₂

Wij gaan voor het gemak in ons gedachtenexperiment uit van een theoretische ideale situatie: de massabalans, de natuurkundige wet: het behoud van massa en de volledige omkeerbaarheid van het verbrandingsproces van methanol. Dus als methanol wordt verbrand, komt er energie vrij die men kan gebruiken om te vliegen. Men houdt dan CO₂ en H₂O over als afvalproducten. Als men CO₂ en H₂O naar CH₃OH gaat omzetten heeft men simpel gezegd ten minste evenveel bijvoorbeeld elektrische energie nodig als er vrij komt bij de verbranding van methanol.

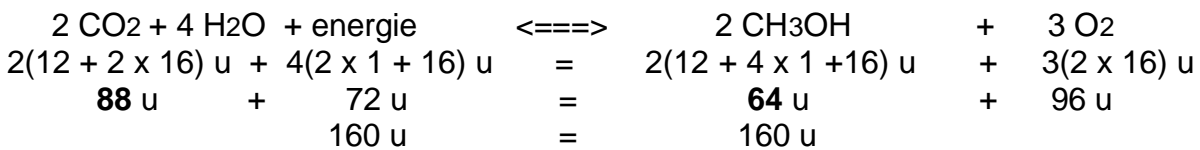
Vraag: Hoeveel kg methanol kan men theoretisch uit 1 kg CO₂ halen?

Atoomgewicht: C = 12 u O = 16 u H = 1 u CO₂ = 12 + 2 x 16 = 12 + 32 = 44 u
 met u = 1,66 x 10⁻²⁷ kg

Verbranding methanol: massabalans



bij omkering:



Bij theoretisch ideaal proces:

88 u CO₂ uit buitenlucht is er ten minste nodig voor 64 u CH₃OH (methanol).
 Dus: **1 kg CO₂** levert op zijn hoogst 64/88 kg methanol = **0,73 kg methanol** op.

Vraag: Hoeveel kg CO₂ heeft men nodig voor 1 liter methanol?

Dichtheid methanol = 0,7914 kg / liter.
 1 kg CO₂ = 0,73 kg methanol en 0,73 kg methanol is 0,73 / 0,7914 = 0,922 liter methanol, dus 1kg CO₂ uit de buitenlucht kan theoretisch 0,922 liter methanol opleveren.

Voor **1 liter methanol** heeft men minstens 1 / 0,922 = **1,085 kg** CO₂ uit de buitenlucht nodig.

Vraag: Hoeveel kg CO₂ heeft men minstens nodig voor productie van 1 kg synthetische kerosine?

Wij gaan voor onze globale berekening weer uit van een ideale theoretische situatie: de omkeerbaarheid van de chemische reacties en de massabalans. Verbranding van kerosine is de chemische reactie van kerosine met zuurstof en dat geeft koolzuurgas, water en energie. Dus theoretisch bij synthetische kerosine productie: energie plus water en koolzuurgas geeft kerosine en zuurstof.

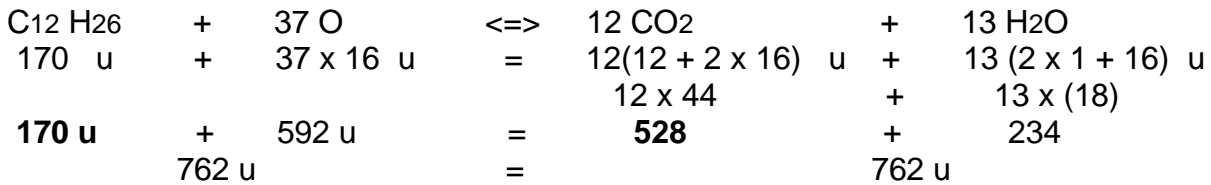
Verbranding kerosine: massabalans

Atoomgewicht koolstof C = 12 u, zuurstof O = 16 u, waterstof H = 1 u
 met u = 1,66 x 10⁻²⁷ kg

Zuivere kerosine: C₁₂ H₂₆

Atoomgewicht kerosine C₁₂ H₂₆: 12 x 12 + 26 x 1 = 144 + 26 = 170 u

Atoomgewicht koolzuurgas CO₂ = 12 + 2 x 16 = 12 + 32 = 44 u



Dus voor de productie van 170 u kerosine heb je *theoretisch* nodig 528 u CO₂, dus voor 1 u kerosine nodig 528 / 170 = 3,1 u CO₂.

Ofwel voor **1 kg kerosine** heb je ten minste nodig **3,1 kg CO₂**.

Vraag: Hoeveel liter buitenlucht heeft men nodig voor 1kg CO₂?

Dichtheid droge buitenlucht op zeeniveau: 1,29 kg/m³.

Buitenlucht heeft 400 ppm CO₂. Ofwel 0,0582 % van het gewicht van de buitenlucht is CO₂. Daarmee bevat 1 m³ buitenlucht ca.: 0,000582 x 1,29 kg = 0,00075 kg CO₂ ofwel 1 / 0,00075 = 1.333 m³ buitenlucht bevat 1 kg CO₂.

Dus voor **1 kg CO₂** heb je minstens **1.333.000 liter buitenlucht** nodig.

Merk op:

Dit is theoretisch hoeveel CO₂ er in de buitenlucht zit. Die krijgt men er nooit voor 100 % uit. In werkelijkheid is er meer lucht nodig om 1 kg CO₂ te maken. En naast CO₂ bevat de aangezogen buitenlucht ook delen van planten, zand en stofdeeltjes, waterdruppeltjes, NO_x, e.d. en allerlei andere vervuilingen. Die vervuiling is een factor 300 groter dan bij industriële rookgassen in de procesindustrie. Hierin verschilt de laboratoriumsituatie en een gangbare praktijk in de procesindustrie met een werkelijkheid van grootschalige inname en chemische filtering van buitenlucht.

We hebben nu de voornaamste grootheden ingeschat om een beredeneerde inschatting te kunnen maken van de minimale omvang en aantallen van de benodigde productie-installaties. In realiteit zal men ongunstiger uitkomen, meer installaties nodig hebben.

3. Productie van methanol, CO₂ captatie en synthetische kerosine voor de lijndienst: Amsterdam – New York.

Om in de methanolbehoefte van de lijndienst: Amsterdam- New York te voorzien, nemen wij de productie van de **renewable methanolfabriek Georg Olah** in Reykjanes in IJsland als referentie. Een aantal jaar geleden is deze fabriek met de recentste en meest geavanceerde carbon recycling technologie feestelijk en onder publieke belangstelling in gebruik genomen.



George Olah carbon dioxide (CO₂) to renewable methanol plant is located at the Svartsengi geothermal power station in the town of Grindavik in Reykjavik, Iceland.

"Renewable methanol (RM) is a synthetic liquid fuel used as gasoline blends to meet the renewable energy directives."

The facility was developed at a cost of ISK1bn (\$8m). Renewable methanol (RM) is a synthetic liquid fuel used as gasoline blends to meet the renewable energy directives.

The construction of the George Olah renewable methanol plant was started in October 2009 and commissioning took place in late 2011. The plant was officially opened in April 2012.

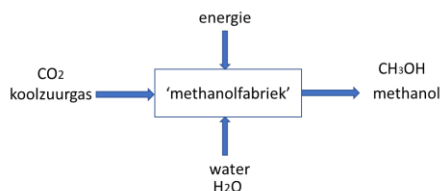
It is named in the honour of the [Nobel laureate in chemistry George Olah](#). The plant is owned by Carbon Recycling International (CRI). It is jointly operated by HS Orka and CRI.

The renewable facility is expected to produce about **five million litres of RM per annum**.

LOCATION Grindavik, Iceland	PRODUCTION CAPACITY Five million litres a year	ESTIMATED INVESTMENT ISK1bn (\$8m)
COMPLETED Late 2011	OWNER Carbon Recycling International (CRI)	OPERATORS CRI and HS Orka



(<https://www.chemicals-technology.com/projects/george-olah-renewable-methanol-plant-iceland/>)



figuur 3: George Olah renewable methanolfabriek, Reykjanes IJsland

In figuur: 3 zien we deze methanolfabriek afgebeeld tijdens de opening en de begeleidende tekst geeft de productiecapaciteit en de betekenis van deze methanolfabriek en technologie voor het produceren van methanol uit CO₂. De productiecapaciteit (5.000.000 liter per jaar) van de George Olah methanolfabriek staat in liters daarom rekenen wij ter vergelijking ook in liters.

Vraag: Hoeveel George Olah methanolfabrieken (zie: figuur 3) heeft men ten minste nodig om de dagelijkse lijndienst: Amsterdam – New York te onderhouden?

Jaarproductie George Olah synthetische methanolfabriek: 5.000.000 liter methanol, dus productie van de fabriek: $5.000.000 / 365 = 13.699$ liter methanol per dag.

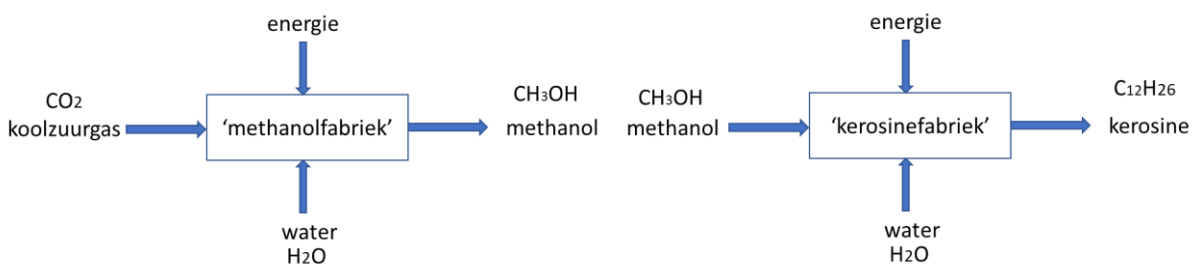
De lijndienst: Amsterdam – New York heeft zoals we al hadden gezien ongeveer de energie nodig van 4.914.000 liter synthetische methanol per dag. Theoretisch benodigd minimaal aantal Georg Olah synthetische methanolfabrieken voor de energiebehoefte voor alleen al het onderhouden van de dagelijks lijndienst: Amsterdam - New York: $4.914.000 / 13.699 = 358$ methanolfabrieken.

Vraag: Hoe lang kan één Boeing 747 op de totale methanolproductie per dag van deze Georg Olah methanolfabriek vliegen?

Verbruik Boeing 747 is: 363.740 liter methanol per retourvlucht. Aantal vliegreizen circa 15 dus het verbruik $363.740 / 15 = 24.250$ liter methanol per vliegreis
Productie fabriek = 13.699 liter methanol per dag.

Een Boeing 747 kan $13.699 / 24.250 = 0,565$ uur ofwel $0,565 \times 60$ minuten = **34 min.** vliegen op de totale dagproductie van de methanolfabriek.

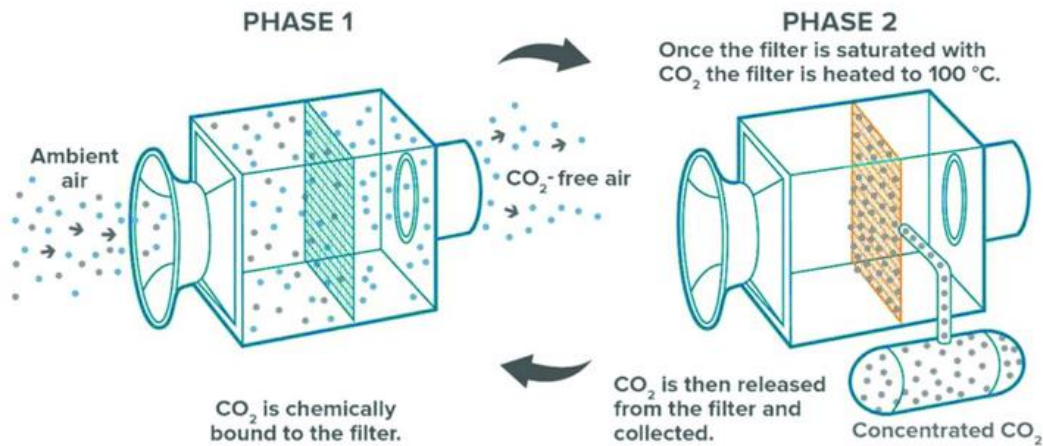
Vraag: Hoe vangt men CO₂ uit de buitenlucht en hoe werkt een DAC, Direct Air Capture van Climeworks?



figuur 4: productiestappen van koolzuurgas tot kerosine

Figuur: 4 laat in grote lijn de productie van synthetische kerosine zien. De keten begint bij de inname van CO₂. Jammer genoeg... een Georg Olah methanolfabriek en soortgelijke fabrieken verwerken alleen de CO₂ uit lucht met een hoog CO₂ gehalte. Zij kunnen geen CO₂ uit de buitenlucht vangen. Daarvoor zijn **extra** speciale CO₂ capture installaties of DAC's voor nodig zie figuur: 5.

'De Georg Olah methaanfabriek gebruikt gas met een hoog CO₂ gehalte afkomstig uit water uit de grond van een vulkanische landschap. Onder de grond bevinden zich daar reservoirs met heet water, de bron van geothermische energiecentrales... "In deze stoom zitten gassen met een CO₂-gehalte van 90 procent", stelt K-C Tran, directeur van Carbon Recycling International (CRI). "Dat is dus een heel rijke bron." ... Die CO₂ bereikt via lange buizen de brandstoffabriek. ' . (In: De ideale biobrandstof: CO₂, ENERGIE & KLIMAAT: Lydia Heida, 18 augustus 2011).



(https://www.researchgate.net/figure/figure/Schematic-illustration-of-Climeworks-direct-air-capture-process_fig2)

figuur 5: schematische illustratie van Climeworks direct air capture (DAC) proces

“Ook uit de atmosfeer kan CO₂ gehaald worden om methanol te synthetiseren. Dit is een stuk moeilijker dan uit uitlaatgassen aangezien de atmosfeer slechts een concentratie van 0.038 % CO₂ heeft. Methanol uit CO₂ -captatie van atmosfeer hebben respectievelijk een **(energetisch) rendement van 38 %** en dit door de benodigde energie om CO₂ los te krijgen van het absorbent. Dit rendement zou met nieuwe technologie kunnen opgetrokken worden tot 44 % voor captatie uit de atmosfeer.... ” (In: *Methanol als brandstof voor moderne vonkontstekingsmotoren: Rendementstudie*, pag. 29. Maarten Van De Ginste, Louis Sileghem. Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur, promotor prof. dr. ir. Roger Sierens, Vakgroep Mechanica van Strooming, Warmte en Verbranding, Academiejaar 2010-2011, Universiteit Gent)

Methanolproductie via CO₂ captatie uit buitenlucht, dus uit lucht met een laag CO₂-gehalte kan technisch en economisch op een industriële schaal. Het energetisch rendement wordt geschat op echter minder dan 50 %. Wat betekent dat minder dan de helft van de (zonne-) energie in de synthetische methanol als “energieaccu” terecht komt. Die geaccumuleerde energie kan men gebruiken voor voortstuwing zoals vliegen. Het komt weer vrij bij de verbranding. Echter de synthetische methanol moet op haar beurt nog opgewerkt worden tot kerosine, een veel betere “energieaccu”, wat ook energie kost.

Gebruikt men niet de zon, maar fossiele brandstof als energiebron voor het productieproces, dan maakt men minstens twee keer zoveel CO₂ aan als men terugwint. Om de netto CO₂ uitstoot te reduceren is men aangewezen op niet fossiele energiebronnen. Bij restwarmte uit fossiele verbranding zou men CO₂ op slechts beperkte schaal kunnen terugwinnen.

Het Zwitserse bedrijf Climeworks vooroplopend in de DAC technologie heeft in 2017 een rendabele installatie gebouwd. Een artikel uit ‘de Ingenieur’ van 1 juni 2017: “CO₂ -winning uit de lucht voedt paprika’s” laat deze recente ontwikkelingen zien.

“Zo heeft het Zwitserse bedrijf Climeworks een apparaat ontwikkeld dat buitenlucht naar binnen zuigt, waar een filter de CO₂ chemisch aan zich bindt. Als het filter verzadigd is, wordt het verhit, waardoor de CO₂ weer vrijkomt, in geconcentreerde vorm. Via een pijpleiding gaat het broeikasgas vervolgens naar een nabijgelegen kassencomplex, waar paprika’s en komkommers worden verbouwd.”

Met hun nieuwste installatie (zie: figuur 6) verwacht Climeworks zo’n 2.460 kg CO₂ per dag te produceren.



figuur 6: Climeworks CO2 capturing installation (2017)

“... Gebald said his team installed 18 carbon dioxide collectors on the roof of a garbage incineration plant outside Zurich. ... The collectors use fans to suck ambient air into filters, which absorb carbon dioxide. ... The collectors capture **2460 kilograms of CO2 per day** (depending on factors such as weather conditions and air composition)... The captured carbon dioxide could also be used to manufacture **transportation fuel**, carbonated soft drinks and other products.... “ (bron : Climate Central, Researching and reporting the science and impacts of climate change, World's First Commercial CO2 Capture Plant Goes Live. By Bobby Magill, Published: May 31st, 2017)

Vraag: Hoeveel Climeworks CO2 capturing installaties, DAC's, heeft men nodig voor CO2 capture uit de buitenlucht t.b.v. van de productie van de kerosine voor de lijndienst: Amsterdam - New York?

Productie van de Climeworks DAC: 2.460 kg CO2 per dag.

Voor 1 kg kerosine heeft men theoretisch tenminste 3.1 kg CO2 nodig.

Dus de CO2 productie van de DAC is goed voor hoogstens $2460 / 3.1 = 794$ kg kerosine per dag.

De lijndienst: Amsterdam – New York verbruikt per dag: $13,5 \times 120.000 = 1.620.000$ kg kerosine. Aantal benodigde Climeworks CO2 captatie installaties is dan minimaal: $1.620.000 / 794 = \mathbf{2.038}$ Climeworks DAC installaties.

Merk op:

We hebben minstens 358 Georg Olah methanolfabrieken nodig.

Dus $2038 / 358 = 6$ Climeworks DAC's zouden ideaal gezien kunnen volstaan in het voorzien in de CO2 behoefte van één Georg Olah methanolfabriek.

Vraag: Hoe lang is dan de ventilatorwand van de DAC's, benodigd voor de productie van kerosine voor de lijndienst: Amsterdam - New York?

Een DAC bestaat o.a. uit een wand van 18 axiaalventilatoren (zie figuur: 6), die de buitenlucht met CO2 naar binnen zuigen en CO2 arme lucht uitstoten. De afmetingen van de installatie zijn, schatten wij, ongeveer 13,5 m lang, 8 m breed en 9 hoog. Het frontoppervlak van de installatie is dan $9 \times 13,5 = 121,5$ m².; het luchtinlaat is circa $6 \times 12 = 72$ m². en het grondoppervlak $13,5 \times 8 = 108$ m².

Voor de dagelijkse lijndienst: Amsterdam - New York heb je tenminste 2.038 DAC's nodig. Dat geeft een ventilatorwand met een frontoppervlak van 9 meter hoog en een lengte van geschat: $2.038 \times 13,5 \text{ m} = 30.570 \text{ m} = \mathbf{27,5 \text{ km}}$. Als de grondoppervlak van de installatie 102 m^2 is, dan zou er een direct netto grondoppervlakte nodig zijn van minsten $2.038 \times 108 = 2.420.104 \text{ m}^2 = \mathbf{24,2 \text{ hectare}}$.

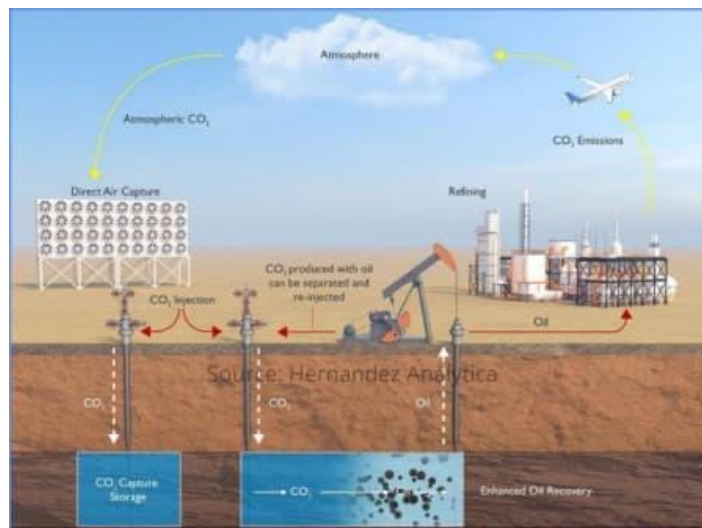
In de werkelijkheid zal het benodigde fabrieksoppervlakte natuurlijk groter zijn in verband met pijpleidingen, opslagtanks, enzovoorts. De landoppervlakte benodigd voor een groene energieopwekking voor deze DAC's is hierin niet meegenomen.

Intermezzo: burgerluchtvaart 100 % groen, de opschaling van CO₂ captatie.

Zoals uit bovenstaande blijkt komt men met de huidige state of the art technologie en installaties er niet. Dit behoeft opschaling. De opschaling van de CO₂ winning uit buitenlucht kent twee vormen: grotere installaties of units (scaling up) en het toepassen van een groot aantal eenheden of units. (scaling out). Het Canadese bedrijf Carbon Engineering (CE) bouwt DAC's net als Climeworks. In 2022 zal het CE een large scale DAC plant gaan bouwen in partnership met 1PointFive. In de inleiding verwezen wij al naar het Reuter persbericht van 10 december 2020 j.l.: "*United Airlines invests in carbon-capture project to be 100% green by 2050.*".

De locatie van de DAC is de desolate Permian Basin in Texas. Een gebied ter grootte van 220.000 km^2 . ofwel ongeveer $220.000 / 41.543 = 5,3$ keer oppervlakte van Nederland met een bevolkingsgrootte van 476.140 inwoners. (bron: Texas Demographic Center, Texas Population Estimates Program Permian Basin Population Estimates; http://demographics.texas.gov/Data/TPEPP/Estimates_2030, october 2018)

In de woorden van Carbon Engineering: "*In 2022, we expect construction to begin on our first large-scale commercial plants in partnership with our growing network of global development partners. Our first project will be deployed in partnership with 1PointFive and will be built in the Permian Basin, U.S. It will capture up to **one million tons of carbon dioxide from the air every year** so it can be permanently and measurably stored underground.*" (bron: <https://carbonengineering.com/news-updates/new-development-company-1pointfive-formed/> Oxy Low Carbon Ventures, Rusheen Capital Management create development company 1PointFive to deploy Carbon Engineering's Direct Air Capture technology - Carbon Engineering)



(Bron: Is This The Carbon Capture Technology Of The Future? Fernando C. Hernandez - Feb 10, 2021, <https://oilprice.com/Latest-Energy-News/World-News/Is-This-The-Carbon-Capture-Technology-Of-The-Future.html>)

Figuur 7: ondergrondse opslag van de CO₂ van de DAC

De gewonnen CO₂ uit de buitenlucht (zie figuur: 1) wordt in tegenstelling tot de suggestie niet gerecycled maar ondergronds opgeslagen en aan de aarde teruggegeven (zie figuur: 7). Pompt men CO₂ met de aardolie weer op dan wordt deze CO₂ van de aardolie gescheiden en weer de grond in gepompt. We halen aardolie uit de grond en pompen het broeikasgas CO₂, het afvalproduct bij verbranding, weer terug de grond in. Dus is strikt genomen dit geen kringloop maar op zijn best een netto zero sum benadering. Het gaat hier om een vorm van afvalscheiding en een ondergrondse opslag van de vliegafval CO₂. De nieuwe vliegtuigbrandstof is noch synthetisch noch groen en ook niet gemaakt van gerecycled CO₂. Het is gewone fossiele kerosine voor business as usual. Het Reuter persbericht: "*United Airlines invests in carbon-capture project to be 100% green by 2050.*" roept vraagtekens op over hoe dan.

Maar, zoals we hebben gezien kan CO₂ ook opgewerkt worden tot synthetische methanol en methanol kan opgewerkt worden tot synthetische kerosine.

4. Grootschalige CO₂ captatie en productie synthetische kerosine voor de lijndienst: Amsterdam – New York

Vraag: Hoe groot is de capaciteit van de grootschalige Carbon Engineering CO₂ captatie plant uitgedrukt in kg kerosine?

De productie van de Carbon Engineering DAC - plant is geraamd op 1.000.000 ton ofwel 1.000.000.000 kg CO₂ per jaar. Dit is: $1.000.000 / 365 = 2.740$ ton per dag of 2.740.000 CO₂ kg per dag.

Voor 1 kg kerosine heb je ten minste 3,1 kg CO₂ nodig. Dus deze grootschalige CO₂-captatiefabriek is theoretisch hoogstens goed voor $2.740.000 / 3,1 = 884.000$ kg kerosine per dag.

Vraag: Hoeveel Carbon Engineering DAC's heeft men minimaal nodig voor de kerosinebehoefte van de lijndienst: Amsterdam – New York?

Verbruik: lijndienst: Amsterdam – New York = $13,5 \times 120.000 = 1.620.000$ kg kerosine per dag. De toekomstige DAC van CE voorziet in de CO₂ behoefte voor de kerosine van op zijn hoogst $884.000 / 1.620.000 = 0,5$ dag in de lucht houden van de lijndienst: Amsterdam- New York.

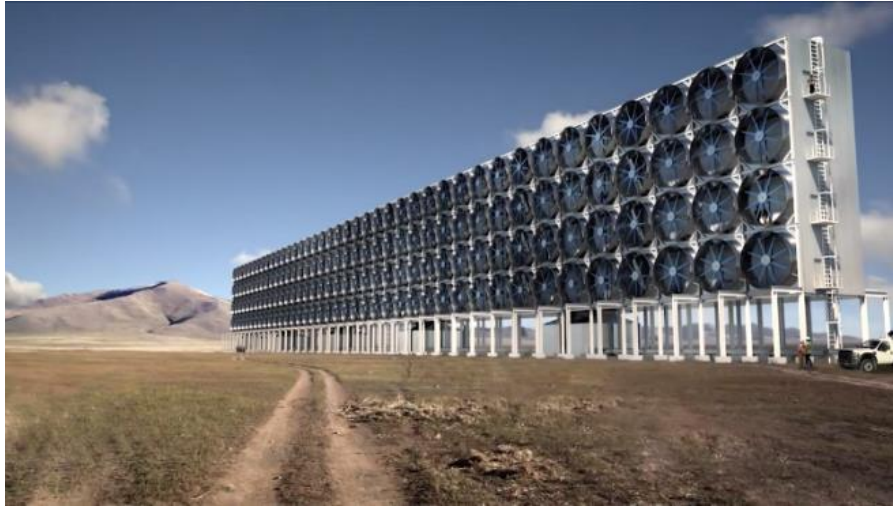
Dus er zijn tenminste **2** grootschalige Carbon Engineering DAC's plants in Texas nodig om de lijndienst: Amsterdam - New York te onderhouden.

Vraag: Hoe groot en duur is zo'n Carbon Engineering DAC plant dan?

De CO₂ captatie begint met het inzuigen van nagenoeg stilstaande buitenlucht. Ongeacht hoe de scheidingstechnologie achter de luchtinlaat zich in de toekomst ook mogen ontwikkelen, het benodigde inlaatooppervlak, de grootte van de luchtinlaat blijft nagenoeg even groot. Technologische innovatie is hier geen verbetering in de betekenis van verkleining. Schaalvergroting betekent hier het vergroten van het aantal inlaatunits en daarmee het inlaatooppervlak. Opschalen is dan scaling out.

Hierbij merken we nogmaals op, dat het afvangen van CO₂ uit de buitenlucht slecht de eerste stap is in het industriële productieproces van synthetische kerosine. Daarna zal de CO₂ ook nog opgewerkt moeten worden via bijvoorbeeld het Fischer-Tropsch proces tot uiteindelijk kerosine.

Hoe men de CO₂ uit de buitenlucht haalt, of dat dat nu een filterproces is met een vast of een vloeibaar absorptiemiddel, is hier nu minder relevant. Hoe dan ook zal men buitenlucht moeten aanzuigen met grote axiaal-ventilatoren. In figuur: 8 geeft CE een impressie van zo'n captatie-unit. De beoogde Carbon Engineering DAC bestaat uit vele van zulke units. De lucht wordt hierbij haaks (cross flow) op de zwaartekracht aangezogen. Dit vergroot de capaciteit van de unit fors vergeleken bij de traditionele (counter flow) torens uit de procesindustrie.



figuur 8: impressie van de ventilatormuur van een Carbon Engineering DAC unit

Om de grootte van deze plant in te schatten gaan we uit van kentallen die worden gehanteerd in een in 2019 verschenen en gezaghebbende Amerikaanse studie naar 'Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration'. "... At the optimized conditions considered in this study (75 percent capture and $V = 1.5$ m/s), a cross-sectional area of roughly 38,000 m². is required to capture 1 Mt/y CO₂ or the equivalent of 10 air contactor units with packing dimension of 20 m × 200 m × 8 m per unit...".

(pag: 225: Direct Air Capture." National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2019. Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. Washington, DC: The National Academies Press. doi: 10.17226/25259.x).

The Academies of Sciences, Engineering and Medicine hanteren als kental een inlaatoppervlakte van ongeveer 38.000 m². voor 1 Mt CO₂ per jaar dat wil zeggen 1.000.000 ton CO₂ per jaar. (Met een inlaattrendement van 75 % komt dit inlaatoppervlak overeen met de door ons afgeleide benodigde 1.333 m³ buitenlucht per 1 kg CO₂.) Dit is ook de productiecapaciteit van de te bouwen Carbon Engineering DAC plant in Texas. Deze plant bestaat dan tenminste uit 10 units met een 'packingafmeting' van 200 m lang 20 m hoog en 8 m breed (zie figuur 8). In werkelijkheid zijn de afmetingen van de units groter. Om een tastbaar beeld te geven: het is te vergelijken met de grootte van 10 flatgebouwen van 200 m meter lang en 7 verdiepingen hoog.

Voor de lijndienst: Amsterdam – New York hebben we twee opgeschaalde CE DAC's nodig, dus dan hebben we tenminste 20 van zulke units nodig van 200 lang 20 meter hoog en 8 m breed. Dus een ventilatorwand van **20 meter hoog en 4 km lang**.

Dit is vergelijkbaar met de grootte van een flatgebouw met 7 verdiepingen een lengte van 4 km, ofwel ca. 3.500 4-kamerwoningen waar gemiddeld 7.700 bewoners kunnen wonen.

De investering voor alléén de bouwkosten: bouwskelet, pompen, ventilatoren, opstallen, zonder grond en infrastructuur wordt geschat 115 miljoen euro per CE DAC. Voor 2 DAC's vergt dit al een investering van 230 miljoen euro.

Hierbij is nog geen rekening gehouden met de investering in de 'gas tot kerosine fabriek' en de kosten van het fabrieksterrein, de investeringskosten van de opwekking van duurzame niet fossiele energie, bijvoorbeeld zonne-energie, want windmolens zijn minder geschikt en daarvoor benodigde bruto landoppervlak. Immers de units moeten voldoende ver uit elkaar staan anders vangt men buitenlucht met geen of bijna geen CO₂ op. Let wel, dit deel van de totale investering is al nodig voor het CO₂ neutraal in de lucht houden van alleen de lijndienst: Amsterdam - New York.

Vergelijken we de grootte van deze toekomstige CE DAC met de benodigde de ventilatorwand bestaande uit naast elkaar geplaatste Climeworks DAC's, dan is er zeker sprake van een schaalvoordeel, maar de afmetingen zijn van dezelfde orde van grootte.

Vraag: Hoe groot is het benodigde grondoppervlak van de Carbon Engineering DAC?

Hier bij is het van belang een onderscheid te maken tussen netto en bruto benodigd oppervlak van de fabriek. Netto oppervlak is het oppervlak benodigd voor de opstallen, de units e.d. Het bruto oppervlak is de ruimte die men nodig heeft voor de opstallen en de ruimte tussen de DAC units om te voorkomen dat de units CO₂ arme lucht van de naastgelegen unit opzuigen.

In de hier bovengenoemde studie naar de 1 Mt/y CO₂ DAC geeft een bruto landoppervlak van 7 km². en als men zonne-energie wil gaan toepassen is de benodigde landoppervlak 58,6 km². "When indirect land use is considered, the total land requirement jumps by about 300 times to 7 km². (~1,730 acres)... In the theoretical limit where solar power and the Conservation Stewardship Program (CSP) are used to offset all electric and thermal requirements, total land use escalates to 14,500 acres, or roughly 58.6 km². One-hundred such facilities (representing 100 Mt CO₂ removal per year) would require a land area roughly the size of Delaware." (ibid: pag 226)

Wij hebben twee 1Mt/y CO₂ DAC's nodig. Om daadwerkelijk dagelijks vanuit Amsterdam groen te vliegen op New York hebben we $2 \times 7 = 14$ km². fabrieksterrein en als de elektriciteit van zonne-energie afkomstig is, een landoppervlak van **117,2 km²**. nodig om alleen de CO₂ uit de buitenlucht af te vangen.

Als de oppervlakte van Botlekgebied: 24,75 km² bedraagt dan heeft een daadwerkelijke groene CO₂ captatie-plant de oppervlakte van ruim **vier** keer het oppervlak van het Botlekgebied. Of het zou bijna een derde van de oppervlakte van Rotterdam beslaan. (oppervlakte Rotterdam = 324,1 km²). En dat alleen al voor het groen opvangen van de afval CO₂ van het laten vliegen van de vliegtuigen van de lijndienst: Amsterdam – New York.

Vraag: Hoe groot is dan het oppervlak van de CO₂ arme luchtlaag geproduceerd door de DAC's?

In ons (ideale) geval zijn we uitgegaan van een plant die non stop 24 uur per dag CO₂ vangt en ook non stop afvallucht zonder CO₂ in de omgeving loost in een richting loodrecht op de zwaartekracht. De lucht verticaal met grote snelheid omhoog spuien betekent veel extra energie aan de lucht meegeven en dat kost veel kinetische (elektrische) energie die door ventilatoren aan de lucht zouden moeten worden meegegeven.

De DAC stofzuigt CO₂ uit de lucht, maar loost CO₂ arme lucht. Er is veel onderzoek gedaan naar de gevolgen van een hoog CO₂ gehalte in de buitenlucht. Er is veel minder bekend over de gevolgen van buitenlucht met een laag of geen CO₂ gehalte. Studies wijzen op negatieve gevolgen voor bijvoorbeeld de agricultuur in de omgeving, bloemen en planten, insecten en vogelstand e.d. immers planten groeien via fotosynthese door opname van CO₂ uit de lucht. Studies naar plantengroei onder lucht met 180 ppm CO₂, iets minder dan de helft van de normale concentratie CO₂ laten al een vermindering van de groei van de plantenmassa zien van zo'n 65 %. (p. 3672: Photosynthesis of C₃, C₃-C₄, and C₄ grasses at glacial CO₂ Harshini Pinto, Robert E. Sharwood, David T. Tissue and

Oula Ghannoum* Journal of Experimental Botany, Vol. 65, No. 13, , 2014 doi:10.1093/jxb/eru155 e, www.jxb.oxfordjournals.org)

Dit heeft direct gevolgen voor insecten, vogels, voor het ecosysteem van de directe omgeving. “*This region of local CO₂ depletion could have adverse effects on crop efficiency and the overall health of local habitats.*” (pag 242: Direct Air Capture.” National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2019. Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. Washington, DC: The National Academies Press. doi: 10.17226/25259.x)

Kortom de mogelijke gevolgen van uitputting voor het ecosysteem in de naaste omgeving spelen een rol.

We nemen als referentie voor de dikte van de CO₂ vrije laag de boomhoogte van 20 meter, wat overeenkomt met de hoogte van de ventilatorwand. In dit gedachte-experiment gaan we er even vanuit dat de lucht door de atmosferische toestand niet meteen vermengt. De lucht uitstoot gaat dag en nacht door.

Het volume lucht Q voor 1MtCO₂/jaar DAC is het doorlaatoppervlak A x luchtsnelheid V.
 $Q = 38.000 \times 1,5 = 57.000 \text{ m}^3/\text{sec}$. (ibid: pag 225)
Voor twee DAC's is dat $2 \times 57.000 = 114.000 \text{ m}^3/\text{sec}$.

De snelheid waarmee het oppervlak A van de CO₂ vrije laag toeneemt is $Q / \text{boomhoogte}$. Dus $\dot{A} = 114.000 / 20 = 5.700 \text{ m}^2/\text{sec} = 5.700 \times 60 \times 60 = 20.520.000 \text{ m}^2/\text{uur} = 20,5 \text{ km}^2/\text{uur}$.



CO₂ vrije deken met oppervlakte A

figuur 9: geproduceerde CO₂ vrije laag als uitstoot DAC

Oppervlakte **Botlekgebied**: 24,75 km².

Met deze uitstoot is in $24,76 / 20,5 = 1,2$ uur het gehele Botlek gebied met een CO₂ arme luchtlaag te bedekken.

Oppervlakte **Rotterdam** = 324,1 km².

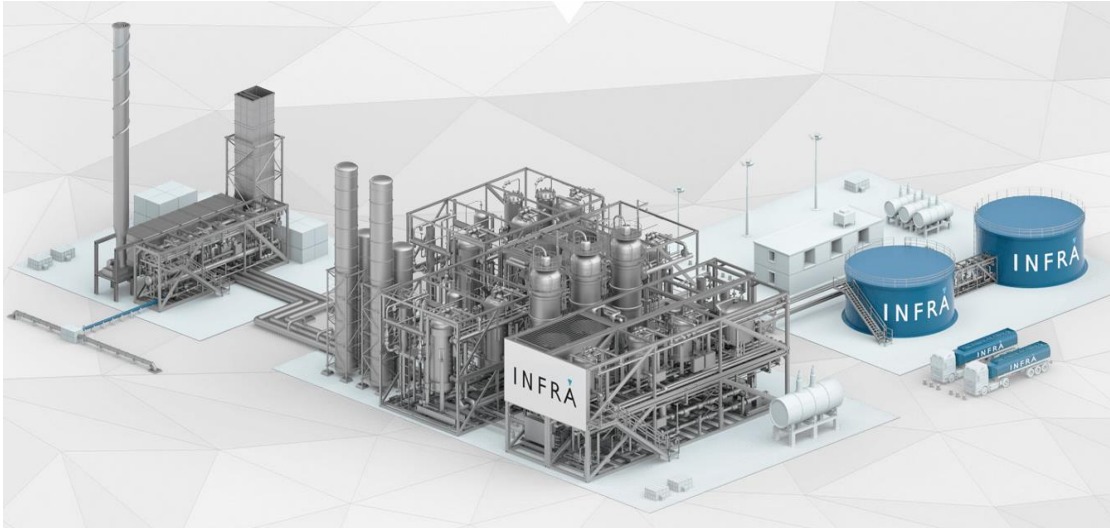
In $324,1 / 20,5 = 15,8$ uur is heel Rotterdam met een CO₂ arme luchtlaag te bedekken.

Oppervlakte **Zuid Holland** = 3.403 km².

Theoretisch zou in $3.403 / 20,5 = 166$ uur = 7 dagen heel Zuid Holland te bedekken zijn met deze boomhoge CO₂ arme deken.

Vraag: Hoe groot moet de Infra M1000 CO₂ opwerkfabriek minstens zijn voor de productie van de benodigde de synthetisch kerosine voor de lijndienst: Amsterdam – New York?

De opgevangen CO₂ uit de CE DAC worden in Texas ondergronds opgeslagen. Maar het kan ook worden opgewerkt met bijvoorbeeld een ‘kerosine fabriek’ op basis van het Fisher-Tropsch proces. Ook hier blijven we tot een globale beschouwing. *INFRA Technology Group* uit Houston bouwt grootschalige units. Figuur:10 geeft een afbeelding van een plant met een capaciteit van 1.000 barrels synthetische olie uit 10 miljoen cubic feet per dag, ofwel 158.987 liter synthetische kerosine per dag. Deze opwerkfabriek geeft een netto oppervlakte van 900 m².



(M1000 guarantees: 1,000 barrels of premium synthetic crude, or premium synthetic fuel (diesel, kerosene, gasoline) from 10 million cubic feet of gas per day. <https://en.infratechnology.com/products/>)

figuur 10: Infra M1000: Modular gas-to-liquids unit

De kerosinebehoefte van de lijndienst: Amsterdam – New York is $13,5 \times 120.000 = 1.620.000$ kg per dag. Soortelijk gewicht kerosine = 0,79 kg / liter.

Dus nodig $1.620.000 / 0,79 = 2.050.600$ liter per dag.

Aantal Infra M1000 units is $2.050.600 / 158.987 = 13$ units met een totaal netto grondoppervlak van $13 \times 900 = 11.600$ m². Er zal ook nog eens **1,16 hectare** extra fabrieksterrein nodig zijn. Dit is exclusief de landbehoefte voor de opwekking van de benodigde groene elektriciteitsopwekking voor het Fischer - Tropsch proces, de elektriciteitsopwekkingsinstallaties, watervoorziening en infrastructuur.

Een verdere raming van de benodigde investeringen en de exploitatiekosten van deze 13 units laten we nu verder achterwegen.

Hiermee hebben we een tastbaar beeld geschetst over wat er technologisch al *minstens* nodig is voor het '100 % green' in de lucht houden van alléén al de lijndienst Amsterdam - New York, een kleine fractie van de vluchtbewegingen in de burgerluchtvaart... Het is een beeld met maatschappelijke betekenis en consequenties.
