



Duurzame transportnetwerken en corridors

# Benutten van belly-capaciteit van passagiersvluchten voor de verduurzaming van luchtvracht

56

De eerste stap naar physical internet

**Tom Roozkrans, Thierry Verduijn**

Hogeschool van Amsterdam

## Samenvatting

In dit paper richt zich op de impact van Physical Internet op luchtvracht. Het concept Physical Internet voorziet in een maasnetwerk waarin luchtvrachtzendingen niet rechtstreeks van herkomst naar bestemming worden gevlogen, maar via verschillende hubs worden gerouteerd om de benutting van de vliegtuigcapaciteit in het gehele netwerk te maximaliseren en de uitstoot van emissies te minimaliseren. Op veel verbindingen wordt de belly-capaciteit van passagiersvliegtuigen niet (volledig) benut. We onderzoeken de duurzaamheidswinst die verladers kunnen realiseren als ze besluiten geen gebruik te maken van full-freighter-diensten op een directe verbinding, maar hun vracht boeken op de belly-capaciteit van passagiersvliegtuigen in een netwerk en hoe het full-freighter-netwerk zich daar op kan aanpassen.

## Inleiding

Physical Internet (PI) is een conceptueel, innovatief en modulair logistiekstelsel dat de interesse heeft gewekt van zowel onderzoekers, beleidsmakers als praktijkmensen als een duurzaam alternatief voor conventionele logistiek. De kern van Physical Internet wordt gevormd door een maasnetwerk waarin veel hubs direct met andere hubs zijn verbonden (in tegenstelling tot een hub-and-spoke). In plaats van het individueel optimaliseren van de capaciteit van elke link waarbij zendingen zoveel mogelijk via een directe verbinding worden vervoerd, richt een PI netwerk zich op het maximaal benutten en optimaliseren van de capaciteit in het netwerk. Door zendingen via een of meerdere hubs te routeren naar bestemming kan telkens met een vol vervoermiddel getransporteerd worden en kan er ook op minder drukke verbindingen in het netwerk toch een hogere bezetting worden gehaald (Venkatadri, Krishna, & Ülkü, 2016). Dit kan voor zendingen wel betekenen dat de doorlooptijd van het transport langer wordt, maar in veel gevallen zal dit geen problemen opleveren. De maatschappelijke voordelen zijn groot: er zijn minder ritten nodig, er is minder overlast en er is een lagere uitstoot van emissies

Gezien de trage voortgang in de ontwikkeling van emissieloze vliegtuigen en groene energiedragers voor de luchtvaart, is het bereiken van een hogere operationele efficiëntie van cruciaal belang om op schema te blijven voor realisatie van de klimaatdoelstellingen. De implementatie van een PI-netwerk in luchtvracht kan een grote bijdrage leveren aan het reduceren van emissies door het realiseren van een hogere bezetting van vliegtuigen. Een eerste stap in het realiseren van een PI netwerk in air cargo is het benutten van de belly-capaciteit van passagiersvliegtuigen. De motoren van moderne vliegtuigen zijn tegenwoordig zo krachtig en energie-efficiënt dat de beschikbare ruimte in de belly van de passagiersvliegtuigen benut kan worden voor air cargo. Op sommige trajecten wordt deze capaciteit door luchtvaartmaatschappijen al benut, maar er is nog veel capaciteit beschikbaar. Zendingen zullen dan niet altijd via een directe verbinding worden gevlogen, maar via een of meerdere luchthavens hun bestemming bereiken.

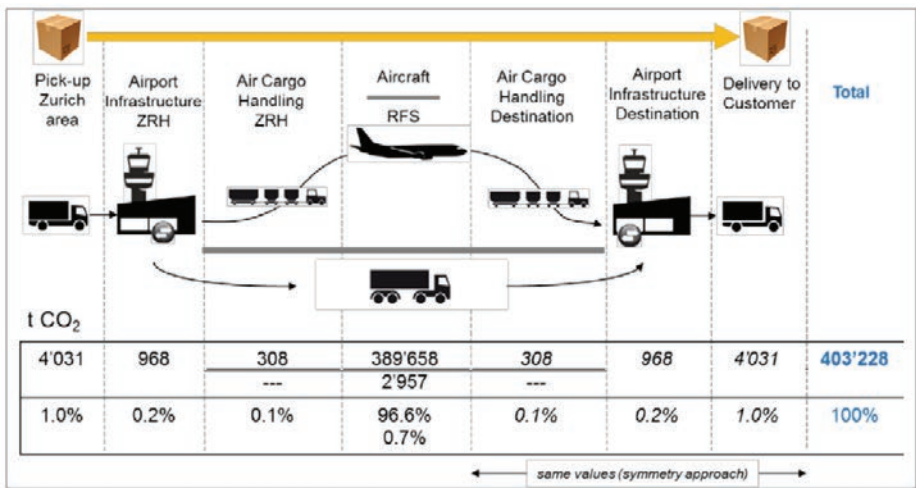
58

Omdat de doorlooptijd hiervan langer is dan een directe vlucht met een Full Freighter zal er een duidelijke incentive moeten zijn voor verladers en expediteurs om toch op het belly-netwerk van het Physical Internet concept te boeken. De verwachting is dat duurzaamheid als incentive bij het boeken van transport een groter rol gaan spelen. Daarom is de eerste onderzoeksvraag in dit onderzoek: "In hoeverre is het gebruik van beschikbare belly-capaciteit in PI-netwerken duurzamer dan het gebruik van Full Freighter-capaciteit?". De hypothese is dat als het belly-netwerk van passagiersvliegtuigen duurzamer is dan het gebruik van Full Freighters, verladers en expediteurs meer en meer zullen kiezen voor het boeken op het belly-netwerk. Daarmee zullen de Full Freighter airlines ook genoodzaakt zien om hun netwerk, routes en frequenties aan te passen. In dit artikel geven we een aantal handelingsperspectieven voor Full Freighter maatschappijen.

In paragraaf 2 zoomen we kort in op het concept Physical Internet om het onderzoek in deze context te kunnen plaatsen. De methodologie van het onderzoek wordt besproken in paragraaf 3. De kwantitatieve analyse voor het bereiken van de emissies van transport in de belly van passagiers vliegtuigen en in full freighters wordt gepresenteerd in paragraaf 4. De handelingsperspectieven voor de doorontwikkeling van full freighter netwerken worden toegelicht in paragraaf 5. Paragraaf 6 sluit af met conclusies en aanbevelingen voor vervolgonderzoek.

## Methodologie

Om de duurzaamheidsanalyse van het gebruik van belly-capaciteit ten opzichte van het gebruik van full freighter capaciteit uit te kunnen voeren, moest eerst worden bepaald welk deel van de transportketen de grootste bijdrage levert aan de uitstoot van CO<sub>2</sub>. Op basis van door Zürich Airport gepubliceerd onderzoek kan worden geconcludeerd dat de vliegreis de grootste bijdrage aan de CO<sub>2</sub>-uitstoot levert in de luchtvrachtketen (Figuur 1). In totaal wordt 96,7% van de CO<sub>2</sub>-emissies in de exportketens van Zürich Airport gerealiseerd door de vlucht zelf.



**Figuur 1** CO<sub>2</sub> emissies van exportzendingen vanaf Zürich Airport (Fleuti & Maraini, 2016)

Om de CO<sub>2</sub>-uitstoot per route te berekenen, zijn berekeningsmethoden uit een studie van Zürich Airport (Fleuti & Maraini, 2016) gebruikt.

$$[\text{Eq. 1}] \quad \text{CO}_2 = \text{EF}(\text{region}) * \text{Flight distance (GCD + correction factor)} * \text{payload}$$

$$[\text{Eq. 2}] \quad \text{EF}(\text{region}) = \text{FB}(\text{flight block}) * \text{EI}(\text{CO}_2) * \text{Distance}(\text{flight block/region}) * \text{Payload}$$

Waarbij:

GCD = Grootcirkelafstand (Great Circle Distance) [km]

EF (region) = Emission Factor per wereld regio [kg CO<sub>2</sub>/t\*km]

FB (flight block) = Totaal brandstofverbruik van een vliegtuig in die regio [kg brandstof]

EI (CO<sub>2</sub>) = Emission index for CO<sub>2</sub> [kg/kg brandstof]

Distance (flight block/region) = Afstand [km] of vlucht in een specifieke wereld regio

Payload = Aantal passagiers (op 100 kg per passagier,  
+ Gewicht van de stoel per passagier (50 kg per stoel)

+ Lege stoelen (aanneمة op gemiddelde bezettingsgraad van 90%)  
+ Cargo (kg)

60

De eerste methode berekent de CO<sub>2</sub>-uitstoot van een vliegreis op basis van de 'emissiefactor per wereldregio' (kg CO<sub>2</sub>/t\*km) EF(region), de vliegafstand (km) en de payload (t). De EF(region) wordt berekend met de 'total fuel burn of plane to that region' (kg brandstof) FB(flightblock), de 'emission index for CO<sub>2</sub>' (kg/kg fuel) EI(CO<sub>2</sub>), de 'distance of flight block per specifieke wereldregio' (km) Distance(flightblock/region), en het laadvermogen (kg). De eerste stap bij het berekenen van de CO<sub>2</sub>-uitstoot van een vliegreis was het berekenen van de EF(region). Om dit te berekenen zijn het FB (flightblock) en het Distance(flightblock/region) opgehaald uit Simbrief. Met Simbrief kan een gebruiker een gesimuleerd vluchtplan genereren op basis van gegevens uit de echte wereld. Met behulp van deze gesimuleerde vliegplannen konden de brandstofbehoefte en de grootcirkelafstand [GCD] worden bepaald op basis van de geselecteerde route, vliegtuigtype, kostenindex [CI] en payload. De tweede stap bij het berekenen van de CO<sub>2</sub>-uitstoot van een vliegreis was het berekenen van de werkelijke uitstoot met behulp van Eq. 1 (zie bijlage B). Op basis van de gekozen route, het veronderstelde laadvermogen en de berekende EF (region) kon de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot in kg worden berekend.

Voor het analyseren van het duurzaamheidseffect van belly-netwerken ten opzichte van full freighter vluchten wordt gebruik gemaakt van een case. De case betreft een airway bill van een zending die vervoerd moet worden van Tel Aviv (TLV) naar Hong Kong (HKG). De redenen voor het kiezen van TLV-HKG zijn: (1) tussen TLV en HKG worden zowel directe passagiers als air cargo vluchten uitgevoerd, (2) er is een groot aantal grotere luchthavens beschikbaar langs de route die gebruikt zouden kunnen worden als hub omdat ze zowel een verbinding hebben met TLV als met HKG. Dit betekent dat het PI-netwerk alle hub-luchthavens in de regio van de luchthaven van herkomst en bestemming kan gebruiken om veel verschillende routecombinaties te creëren. Bovendien liggen de luchthaven van herkomst en bestemming relatief ver van elkaar, waardoor luchtvaartmaatschappijen op de hub luchthavens in de regio van de luchthaven van herkomst en bestemming bijna allemaal gebruik maken van widebody-vliegtuigen met een grotere belly-capaciteit. Tot slot ontstaat er tussen de luchthavens een redelijk grote full freighter-vrachtstroom waardoor bij voldoende belly-capaciteit de full freighter-frequentie eenvoudig kan worden teruggebracht.

Voor de zendingen op dit traject worden vier scenario's uitgewerkt. Het eerste scenario betreft een directe vlucht met een full freighter van Tel Aviv (TLV) naar Hong Kong (HKG) met een 100% load factor. Het tweede scenario betreft het gebruik van onbenutte belly-capaciteit op een indirecte passagiersvlucht van TLV naar HKG via London Heathrow (LHR). In scenario 2 wordt ervan uitgegaan dat de passagiersvluchten sowieso vlucht worden uitgevoerd, ongeacht of er vracht van het PI-netwerk aan boord is of niet. De CO<sub>2</sub>-emissie wordt gebaseerd op het verschil tussen twee exacte dezelfde vluchten met één met de vracht van het PI-netwerk aan boord en één zonder. In het derde scenario worden full freighters ingezet in een indirect netwerk met de veronderstelling dat alle vracht aan boord afkomstig was van het PI-netwerk. In het vierde en laatste scenario opereerden ook full freighters in een indirect netwerk. Een deel daarvan legt het traject TLV-LHR-HKG af, maar op beide trajecten worden de payload aangevuld tot een 100 load factor. In het vierde scenario, wordt er vanuit gegaan dat er al full freighter vluchten actief zijn op de trajecten TLV-LHR en LHR-HKG voor zendingen die een directe verbinding nodig hebben. Dat betekent dat alleen het extra brandstofverbruik hoeft te worden toegerekend aan de PI-zendingen die de indirecte route afleggen.

## PI-netwerk duurzaamheidsanalyse

De resultaten van de duurzaamheidsanalyse van het PI-netwerk zijn gebaseerd op de vier gepresenteerde scenario's.

### Scenario 1. Directe route full freighter emissie

Met behulp van Simbrief wordt geschat dat een Boeing 747-400f [74Y] 130 ton kerosine nodig heeft om van TLV naar HKG te vliegen. In de berekening van Simbrief worden ook de noodbrandstof, alternatieve brandstof en eindreservebrandstof berekend. Noodbrandstof is de brandstof die nodig is voor extra brandstofverbruik onderweg veroorzaakt door wind en routewijzigingen als gevolg van Air Traffic Control. Alternatieve brandstof is de brandstof

die nodig is vanaf het gemiste naderingspunt op de luchthaven van bestemming tot de landing op de alternatieve luchthaven. De eindreservebrandstof is de minimumbrandstof die nodig is om 30 minuten op 1500 voet boven de alternatieve luchthaven te vliegen. Er wordt echter vanuit gegaan dat tijdens deze vlucht alleen de taxi- en tripbrandstof wordt verbruikt. De noodbrandstof, alternatieve brandstof en eindreservebrandstof worden niet gebruikt. Dit resulteert in een brandstofverbruik van totaal van 114.114 kg kerosine.

De vlucht heeft een laadvermogen van 97.956 kg. Dit is ook het maximale laadvermogen waarmee een 74Y kan werken op basis van de grootcirkelafstand GCD en het maximale startgewicht [MTOW]. Simbrief berekent dat de route TLV naar HKG gemiddeld een grootcirkelafstand heeft van 4872 NM of 9.023 km. Zurich Airport stelt voor om een correctiefactor toe te voegen aan de GCD op basis van de reisduur (zie tabel 1). Op basis van deze tabel wordt een correctiefactor van 125 km toegevoegd aan de GCD. Op basis van de CO<sub>2</sub>-emissiefactortabel van Zurich Airport wordt ook geconcludeerd dat voor kerosine een emissie-index van 3,15 kg CO<sub>2</sub>/kg geldt.

**Tabel 1** GCD correctiefactor (ICAO Cargo Carbon Emissions Calculator Methodology, 2016).

Grootcirkelafstand	Correctie op de grootcirkelafstand
Minder dan 550 km	+ 50 km
Tussen 550 km en 5500 km	+ 100 km
Boven 5500 km	+ 125 km

Met behulp van de gepresenteerde formules komt de emissie totaal op 359459 kg CO<sub>2</sub>. Dat betekent per vervoerde kg payload een emissie van 3,67 kg CO<sub>2</sub> bij een 100% benutting van de payload. Dit is een zeer gunstige aanname omdat full freighters met een gemiddelde bezetting van 70% vliegen (Loadstar, 2021). In wekelijkheid zal de emissie per kg payload dus hoger liggen.

**Tabel 2** Brandstofverbruik en emissies in scenario 1

Scenario 1. full freighter directe route TLV-HKG	TLV-HKG
Brandstof verbruik (kg)	114.114
Payload (kg)	97956
Emissie CO <sub>2</sub> (kg)	359459
CO <sub>2</sub> /payload (kg)	3,67

## **Scenario 2. Indirecte route belly-capaciteit emissies**

In scenario worden zendingen meegegeven in de belly van passagiersvliegtuigen die toch al in het netwerk vliegen. De inzet van belly-capaciteit van passagiersvliegtuigen in termen van CO<sub>2</sub>-uitstoot is efficiënter is dan de inzet van full freighters. In een PI-netwerk wordt vracht bijna altijd vervoerd via 1 of 2 transferluchthavens. Vluchten op routes met 1 of 2 overstapluchthavens hebben een veel groter optimaal specifiek bereik. Specifiek bereik is de afstand die een vliegtuig aflegt per verbruikte eenheid brandstof. Op lange vluchten moet een vliegtuig meer brandstof meenemen om de volledige afstand te kunnen halen en dat gaat ten koste van het laadvermogen en daarmee de emissies per tonkm vervoerde lading. Als passagiersvluchten geselecteerd worden die een duidelijk kortere afstand vliegen dan wordt hier al voordeel mee gehaald. De andere factor die relevant is voor CO<sub>2</sub>-emissies is de belastingsfactor. Om de impact van deze factor te bepalen, wordt de route TLV-LHR-HKG gebruikt. Met opnieuw de vergelijkingen van Fleui & Maraini kan de extra CO<sub>2</sub>-uitstoot op deze route worden berekend. Met behulp van Simbrief en dezelfde aannames als eerder genoemd, is de extra CO<sub>2</sub>-uitstoot op deze route berekend in de volgende stappen:

Met behulp van Simbrief zijn de GCD per etappe en brandstofbehoefte per etappe bepaald. Beide routes worden twee keer in Simbrief berekend, de eerste zonder de bijlading van het PI-netwerk en de tweede met de bijlading van het PI-netwerk. Belangrijk is om rekening te houden met het feit dat er verschillende type toestellen op de routes worden ingezet. Op de route TLV-LHR is dat een Boeing 787. Op de route van LHR naar HKG is dat een Boeing 777. In deze case wordt aangenomen dat ongeveer 50% van het laadvermogen in gewicht wordt gebruikt door PAX-bagage, 25% door overige vracht en 25% voor vracht in het PI-netwerk. Dit percentage heeft uiteindelijk geen impact op de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot.

Opgemerkt moet worden dat 10.000 kg die vanuit TLV via LHR naar HKG op het traject tussen LHR en HKG nog gezelschap krijgt van ongeveer 9000 kg cargo. Dit betekent dat de etappe TLV-LHR 4.472 kg CO<sub>2</sub> extra uitstoot voor het vervoer van ongeveer 10.000 kg vracht en de etappe LHR-HKG 19.516 kg CO<sub>2</sub> extra uitstoot voor het vervoer van ongeveer 17.500 kg lading. Dit betekent dat de emissie van TLV-LHR moet worden gedeeld door 10.000 kg om de uitstoot per kg payload te berekenen. Op het traject LHR-HKG wordt de extra CO<sub>2</sub> gedeeld door 17500 kg. In een PI netwerk worden zendingen gecombineerd als er nog capaciteit in het netwerk aanwezig is op een bepaalde route. De totale emissie per kg van zendingen die de route TLV-LHR-HKG afleggen is 1,57 (0,45 + 1,12).



**Tabel 3** Brandstofverbruik en CO<sub>2</sub>-emissies op de route TLV-LHR-JKG/scenario 2

<b>Scenario 2. belly PI netwerk TLV-LHR-HKG</b>	<b>TLV-LHR</b>	<b>LHR-HKG</b>
GCD + correction (km)	3674	10371
Brandstofverbruik zonder lading PI netwerk (kg)	22,989	85,758
Payload zonder lading PI netwerk (kg)	29857	52659
Brandstofverbruik met lading PI netwerk (kg)	24371	91880
Payload met lading PI netwerk (kg)	39782	70142
Emissie CO <sub>2</sub> zonder lading van PI-netwerk (kg)	74386	273394
Emissie CO <sub>2</sub> met lading van PI-netwerk (kg)	78858	292910
Verschil CO <sub>2</sub> (kg)	4472	19516
Extra PI Payload (kg)	9925	17483
CO <sub>2</sub> /PI Payload (CO <sub>2</sub> /kg)	0,45	1,12

64

**Scenario 3. Indirecte route full freighter emissies #1**

Om te vergelijken of full Freighters onder alle omstandigheden minder duurzaam zijn dan de belly-capaciteit van passagiersvliegtuigen in PI-netwerken, wordt de route TLV-LHR-HKG opnieuw geanalyseerd, maar dan uitgevoerd met full Freighters. Net als het belly-netwerk van passagiersvliegtuigen kunnen full freighters ook hubs en indirecte routes gebruiken om de vracht te vervoeren. Dit scenario analyseert de impact wanneer full freighters gebruik maken van indirecte routes. De reden waarom het belangrijk is om een PI-netwerk te analyseren van full-freighters die indirecte routes exploiteren, is omdat met de mogelijkheid dat belly-capaciteit de volledige vrachtcapaciteit vervangt, full-freighters mogelijk met een lagere bezettingsgraad opereren. Om deze lagere bezettingsgraad te compenseren, zouden luchtvaartmaatschappijen kunnen besluiten om full-freighters op indirecte routes in te zetten om een PI-netwerk te vormen om de vrachtstromen samen te voegen.

Simbrief zal opnieuw worden gebruikt in combinatie met de eerdere aannames en vergelijkingen om de emissie te berekenen. In dit scenario vervoert een B74Y ongeveer 100 ton vracht van TLV naar LHR naar HKG. Op het traject LHR-HKG is dat maar 79 ton vanwege de lengte van het LHR-HKG-traject het Maximum Take-Off Weight [MTOW] van de B74Y het laadvermogen beperkt tot maximaal 79 ton.

**Tabel 4** Brandstofverbruik en emissies in scenario 3

<b>Scenario 3. full freighter indirect route TLV-LHR-HKG</b>	<b>TLV-LHR</b>	<b>LHR-HKG</b>
<b>GCD + correction</b>	3674	10371
<b>Brandstofverbruik met lading PI netwerk</b>	55243	131.914
<b>Payload met lading PI netwerk</b>	97956	79000
<b>Emissie CO<sub>2</sub> met lading van PI-netwerk</b>	174017	420544
<b>CO<sub>2</sub>/PI Payload (CO<sub>2</sub>/kg)</b>	1,78	5,32

Geconcludeerd wordt dat het gebruik van full freighters op een indirect netwerk niet alleen meer CO<sub>2</sub> uitstoot in vergelijking met belly-capaciteit in PI-netwerken, maar ook meer dan de directe route van TLV naar HKG, zelfs bij vervoer van 21 ton minder vracht. De reden waarom de directe route duurzamer is omdat deze totale indirecte route langer is dan de directe route en zelfs een tweede etappe (LHR – HKG) bevat die langer is dan de totale directe route. De reden waarom het indirecte netwerk met belly-capaciteit veel duurzamer is dan het indirecte full-freighternetwerk is daarnaast omdat wordt aangenomen dat het indirecte netwerk met belly-capaciteit gebruik maakt van vliegtuigen die al actief zijn, ongeacht of ze het PI-netwerk vracht vervoeren of niet. Dit betekent dat het indirecte netwerk van de belly-capaciteit alleen de CO<sub>2</sub> produceert die ontstaat door de extra lading die het vliegtuig moet vervoeren. In feite vervoert het indirecte netwerk met belly-capaciteit ook passagiers en vracht buiten het PI-netwerk, terwijl het indirecte volledige vrachtnetwerk alleen de vracht van het PI-netwerk vervoert.

Dit scenario is echter niet helemaal eerlijk om te vergelijken met het tweede berekende scenario. De reden waarom de lading van 100 ton vervoerd in de belly-capaciteit van TLV-LHR-HKG veel efficiënter is in vergelijking met de rest, is omdat werd aangenomen dat de vlucht zou plaatsvinden ongeacht of de lading van het PI-netwerk aan boord was of niet. Daarom zijn de emissies die in dit scenario worden gegenereerd slechts een product van het extra gewicht dat de lading van het PI-netwerk op het vliegtuig uitoefent. De emissies die worden gegenereerd in de vracht van 79 ton die wordt vervoerd in full Freighters op de route TLV-LHR-HKG gaat ervan uit dat de vlucht alleen plaatsvindt omdat deze de lading van het PI-netwerk moet vervoeren. Dit betekent dat het hele traject verantwoordelijk is voor de uitstoot van CO<sub>2</sub>.

### Scenario 4. Indirecte route full freighter emissies #2

In dit scenario wordt aangenomen dat er al een full freighter actief is op het traject TLV-LHR en dat er in het kader van het PI netwerk 20.000 kg vracht op beide trajecten extra meegenomen kan worden. Dat is vracht die niet wordt gerouteerd op onbenutte belly-capaciteit van passagiersvliegtuigen, maar in onbenutte full-freightercapaciteit. De route TLV-LHR-HKG wordt daarom opnieuw geanalyseerd. Elke etappe wordt twee keer berekend. Een keer met de lading van het PI-netwerk en een keer zonder de lading van het PI-netwerk. Het verschil tussen de twee berekeningen voor elke etappe wordt bepaald en opgeteld tot het totaal van de emissies die door dit scenario worden gegenereerd. Met Simbrief is ook voor deze vluchten berekend wat het brandstofverbruik is.

**Tabel 5** Brandstofverbruik en emissies in scenario 4

Scenario 4. full freighter indirect route TLV-LHR-HKG	TLV-LHR	LHR-HKG
GCD + correction	3,674 km	10012
Brandstofverbruik zonder lading PI netwerk	46470	115337
Payload zonder lading PI netwerk	68100	68100
Brandstofverbruik met lading PI netwerk	50861	124306
Payload met lading PI netwerk	88100	88196
Emissie CO <sub>2</sub> zonder lading van PI-netwerk	150365	367847
Emissie CO <sub>2</sub> met lading van PI-netwerk	164573	392542
Vershil CO <sub>2</sub> (kg)	14208	24695
Vershil in payload	20000	20096
CO <sub>2</sub> /PI Payload (CO <sub>2</sub> /kg)	0,71	1,23

Dit resulteert in een totale uitstoot van 38.903 kg CO<sub>2</sub> (14208 en 24695 kg CO<sub>2</sub>) voor het indirect vervoeren van 20 ton lading in full freighters van TLV naar HKG via LHR. Voor zendingen die de route TLV-LHR-HKG afleggen betekent dit 1,94 kg CO<sub>2</sub> per kg payload.

### Vergelijken van de emissies in de verschillende scenario's

Uit de vier scenario's worden de volgende resultaten geconcludeerd (Zie Tabel 6). Aan de hand van deze resultaten kan worden geconcludeerd dat het benutten van de lege capaciteit van passagiersnetwerken de meest duurzame oplossing als daarmee kan worden voorkomen dat er een full freighter vliegt tussen Tel Aviv en Hong Kong. In deze case komt de indirecte route van een full freighter via LHR nog redelijk in de buurt met de gemiddelde CO<sub>2</sub> uitstoot per kg van 1,94 kg/kg vervoerd gewicht.

**Tabel 6** Emissies in de verschillende scenario's

Scenario	CO <sub>2</sub> (kg)
Scenario 1. full freighter directe route TLV-HKG (basis scenario)	3,67
Scenario 2. belly PI-netwerk TLV-LHR-HKG	1,57
Scenario 3. full freighter indirecte route TLV-LHR-HKG	6,80
Scenario 4. full freighter indirecte route TLV-LHR-HKG	1,94

## Discussie

Dit hoofdstuk bespreekt de beperkingen en robuustheid van het onderzoek dat voor dit artikel is uitgevoerd. De analyse van de impact van PI-netwerken en het gebruik van belly-capaciteit als alternatief voor full freighters is gebaseerd op één case. Een casestudy geeft inzicht in de manier waarop factoren elkaar beïnvloeden en is nuttig om een vraagstuk beter te begrijpen. Er is echter een aantal factoren die dit resultaat veranderen wanneer de beschreven methode zou worden toegepast op een ander routevoorbeeld. De eerste factor die dit resultaat verandert is het vliegtuigtype dat op de route wordt gebruikt. Hoewel de capaciteit van het type vliegtuig niet noodzakelijk de emissiereductie verandert, doet de brandstoffefficiëntie van het vliegtuig dat wel. Hoe efficiënter het brandstofverbruik van een passagiersvliegtuig met belly-capaciteit is ten opzichte van het type full-freightervliegtuig, hoe hoger deze emissiereductie zal zijn. Bovendien, hoe groter de belly-capaciteit van het type passagiersvliegtuig, hoe sneller de behoefte aan full freighters kan worden afgebouwd.

De tweede factor die van invloed is op de gerealiseerde emissiereductie is de afstand van de geselecteerde luchthavens. Hoe groter de grootcirkelafstand tussen twee luchthavens, hoe groter het potentieel van een PI-netwerk. Dit potentieel kan in twee categorieën worden opgesplitst. Allereerst geldt: hoe langer de grootcirkelafstand, hoe meer belly-capaciteit beschikbaar is tussen de luchthavens. Dit wordt veroorzaakt door een toename van routecombinaties die het luchthavenpaar kunnen verbinden. Bovendien geldt: hoe langer de grootcirkelafstand, hoe meer CO<sub>2</sub>-uitstoot wordt bespaard door gebruik te maken van belly-capaciteit in plaats van volledige vrachtcapaciteit. De belangrijkste toeschrijvende factor hieraan is het hogere specifieke bereik van 1-stop en 2-stop vluchten.

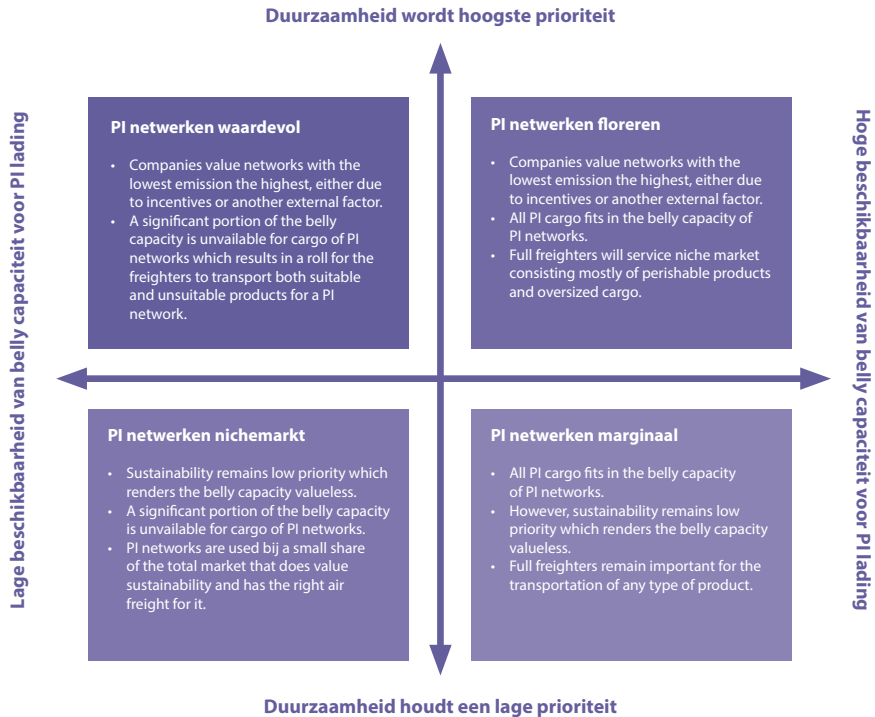
Hoewel factoren als het weer (windrichting, windkracht, etc.) ook van invloed zijn op de CO<sub>2</sub>-uitstoot, kunnen deze factoren worden verwaarloosd bij het kiezen van verschillende routes, omdat ze de belly-capaciteit en de volledige vrachtcapaciteit in hetzelfde tempo beïnvloeden. Deze weersfactoren worden echter berekend in de Simbrief-tool om een iets nauwkeuriger weergave van de echte wereld te geven.

Daarnaast is nog belangrijk om te vermelden dat niet alle luchtvracht is geschikt voor een PI-netwerk. Sommige luchtvracht past niet in de belly van passagiersvliegtuigen, die past alleen op het bovendek van een full freighter. Sinds KLM Cargo the combi's heeft uitgefaseerd is de optie om mee te vliegen niet meer beschikbaar. Een deel van de luchtvracht is ongeschikt vanwege bederfelijkheid of andere kenmerken (zoals waardevolle of levende zendingen) waardoor het niet wenselijk is om zendingen via meerdere hubs te vervoeren. Omdat een deel van de luchtvracht niet geschikt is voor een PI-netwerk, zal er altijd behoefte zijn aan full freighter capaciteit. De vraag die dan opkomt is wat de mogelijke rol van full freighters in de toekomst is.

### **Rol van full freighters in de toekomst**

Als alle geschikte luchtvracht naar de belly-capaciteit van vliegtuigen verplaatst, kan een gevolg zijn dat er onvoldoende vraag is naar volledige vrachtcapaciteit om winstgevend volledige vrachtroutes te exploiteren. Dit kan ertoe leiden dat volledige vrachtcapaciteit in PI-netwerken moet worden opgenomen om de benutting van de volledige vrachtcapaciteit te optimaliseren. Op deze manier wordt zowel de belly-capaciteit als de bezettingsgraad van het volledige vrachtschip geoptimaliseerd met de focus op duurzaamheid en geschiktheid voor belly-capaciteit. Elke luchtvracht die snellere levertijden, grotere afmetingen en overmatige vraag naar belly-capaciteit vereist, wordt verschoven en geconsolideerd naar volledige vrachtcapaciteit. De mate waarin de volledige vrachtcapaciteit moet worden geconsolideerd, hangt af van de beschikbare belly-capaciteit in een netwerk.

Daarnaast betekent de verduurzaming als gevolg van PI-netwerken niet dat elke partij overstapt op PI-netwerken alleen omdat het duurzamer is. Daarom is een overzicht van vier scenario's weergegeven in figuur 2.



**Figuur 2** Overzicht van de rol van full freighters bij verschillende ontwikkelingsscenario's van PI

### PI-netwerken floreren

In het scenario 'PI Netwerken Floreren' beschouwen expediteurs en luchtvaartmaatschappijen duurzaamheid als de hoogste prioriteit bij de besluitvorming op alle niveaus van de organisatie en voor zowel de korte als de lange termijn. Dit wordt ofwel veroorzaakt door stimuleringsmaatregelen van de overheid of door de heffingen en regelgeving die de uitstoot van CO<sub>2</sub> belasten of afdwingen. Expediteurs en luchtvaartmaatschappijen hebben een sterke economische prikkel om luchtvrachtcapaciteit beter te benutten.

Daarnaast kan (bijna) alle PI-lading worden vervoerd in de belly-capaciteit van PI-netwerken omdat ook luchtvaartmaatschappijen die vooral gericht zijn op het vervoer van passagiers een sterke economische prikkel krijgen om hun belly-capaciteit aan te bieden en samen te werken met andere maatschappijen. Luchtvaartmaatschappijen investeren in cargo handling processen om de logistieke processen op hub zo efficiënt en snel mogelijk te laten verlopen. Omdat (bijna) alle PI-vracht in de belly van passagiersvliegtuigen wordt vervoerd, is de inzet van full freighters die vooral wordt ingezet op routes met lading die niet geschikt is voor het vervoer in een belly (te groot) of niet via een of meerdere hubs vervoerd kan

worden en directe passagiersvluchten onvoldoende capaciteit bieden (bijvoorbeeld bloemen uit Kenia naar Amsterdam).

Omdat vliegen in de belly van het passagiersnetwerk duurzamer is dan vliegen met een full freighters neemt de vraag naar full freighter capaciteit op specifieke routes af en leidt tot een lagere bezetting van full freighters. Voor lading die niet in bellies past zullen de full freighter maatschappijen ook een PI-netwerk ontwikkelen om de load factor van de vliegtuigen te verhogen. Ook die lading zal dus via een of meerdere hubs vervoerd worden van herkomst naar bestemming. In enkele gevallen waarin de vraag naar vrachtcapaciteit voor perishables (bijvoorbeeld versproducten, technologie en spare parts) op een directe verbinding de beschikbare belly capaciteit overschrijd zullen full freighters de benodigde capaciteit leveren. In deze netwerken zullen full Freighters directe routes exploiteren tussen luchthavens met hoge vrachtvolumes en lage passagiersstromen.

### **PI-netwerken waardevol**

Het tweede mogelijke scenario heet 'PI Netwerken Waardevol'. Net als het scenario 'PI netwerken floreren' beschouwen expediteurs en luchtvaartmaatschappijen in dit scenario duurzaamheid als de hoogste prioriteit bij besluitvorming op alle niveaus van de organisatie en voor zowel de korte als de lange termijn. In dit scenario is de beschikbaarheid van belly-capaciteit voor PI-lading vergeleken met het vorige scenario laag omdat er nog onvoldoende samenwerking tussen luchtvaartmaatschappijen is om voldoende beschikbare en toegankelijke belly-capaciteit te creëren. Door de combinatie van deze twee factoren waarden expediteurs netwerken met de laagste emissie het hoogst, hetzij door prikkels, hetzij door een andere externe prikkels. Door de lage beschikbaarheid en bereikbaarheid van belly-capaciteit in PI-netwerken zullen echter nog steeds full freighters nodig zijn voor het transport van zowel geschikte als ongeschikte producten voor een PI-netwerk.

Naar verwachting zal dit scenario de eerste fase zijn in de ontwikkeling van PI-netwerken. Deze implementatie wordt in gang gezet door het creëren van een prikkel om duurzaam te waarden als de hoogste prioriteit voor expediteurs. Luchtvaartmaatschappijen zullen dan beginnen met het implementeren van PI-netwerken om aan deze vraag te voldoen. Na de eerste fasen van implementatie zullen luchtvaartmaatschappijen gaan samenwerken waarna de overgang naar het scenario 'PI netwerken floreren' zal plaatsvinden.

### **PI-netwerken marginaal**

Het derde mogelijke scenario heet 'PI netwerken marginaal'. In dit toekomstscenario blijft duurzaamheid een lagere prioriteit krijgen in de luchtvrachtketen. Daarom beschouwen

expediteurs en luchtvaartmaatschappijen duurzaamheid als een 'nice to have' bij de besluitvorming op alle niveaus van de organisatie en voor zowel de korte als de lange termijn, maar in het boekingsproces blijven expediteurs primair kostengedreven. Dit wordt ofwel veroorzaakt door snelle technologische innovatie waardoor procesoptimalisatie onbeduidend is voor duurzame doelen of omdat er geen externe factoren worden geïmplementeerd die de prioriteit van duurzaamheid verhogen door overheden en/of andere internationale regelgevende instanties.

Om echter te anticiperen op het gebruik van PI-netwerken, werken luchtvaartmaatschappijen met elkaar samen als er voldoende belly-capaciteit beschikbaar en deze gemakkelijk toegankelijk en inzetbaar is. Hoewel het gebruik van deze belly-capaciteit in PI-netwerken efficiënter is vanuit een duurzaam perspectief, is dit misschien niet waar vanuit een kostenperspectief. Luchtvracht die in belly-capaciteit van passagiersvliegtuigen wordt vervoerd, heeft immers vaak langere reistijden en een hogere kosten van vrachtafhandeling.

In dit scenario blijven full freighters belangrijk voor het vervoer van luchtvracht, ook al zou een groot deel van de vracht in de belly-en van passagiersvliegtuigen kunnen worden vervoerd. Vanwege de schaalvoordelen en minder vrachtafhandeling blijven full freighters superieur aan de belly-capaciteit totdat er een prikkel wordt gecreëerd om prioriteit te geven aan duurzaamheid. De verwachting is dat dit scenario de eerste fase zal zijn na de implementatie van PI-netwerken waarin luchtvaartmaatschappijen anticiperen op het belang van duurzaamheid terwijl een prikkel om prioriteit te geven aan duurzaamheid nog steeds ontbreekt. Of het scenario 'PI-netwerken waardevol' of het scenario 'PI-netwerken marginaal' zich voordoet na de implementatie van PI-netwerken, hangt ervan af of het creëren van de prikkel voor het prioriteren van duurzaamheid plaatsvindt vóór of na de medewerking van luchtvaartmaatschappijen om een toegankelijke en beschikbare PI-netwerk.

71

### **PI-netwerken nichemarkt**

Het vierde en laatste mogelijke scenario heet 'PI netwerken nichemarkt'. In dit scenario blijft duurzaamheid een lagere prioriteit houden. Bovendien is de beschikbaarheid voor PI-lading in belly-capaciteit laag. Deze combinatie resulteert in een scenario waarin de belly-capaciteit in PI-netwerken wordt gebruikt door een klein deel van de totale markt dat duurzaamheid wel waardeert en het juiste type luchtvracht heeft om van dit netwerk gebruik te maken. Het gaat vooral om verladers die zeer nadrukkelijk streven naar een lage CO<sub>2</sub>-footprint en bereid zijn daar ook iets meer voor te betalen. Het grootste deel van de markt ziet geen meerwaarde in het gebruik van belly-capaciteit in PI-netwerken omdat duurzaamheid onbelangrijk blijft en capaciteit beperkt beschikbaar is. In dit scenario zal het aandeel full Freighters voor het vervoer van luchtvracht toenemen door de groeiende



omvang van de luchtvrachtmarkt, de schaalvoordelen, minder vrachtafhandeling, onbelangrijkheid van duurzaamheid en het kunnen vervoeren van alle soorten vracht.

## Conclusion

PI maakt het gebruik van ongebruikte belly-capaciteit mogelijk. Het benutten van beschikbare belly-capaciteit kan bijdragen aan het terugdringen van de CO<sub>2</sub>-uitstoot. In het geval van de geanalyseerde real-world routevoorbeelden in dit onderzoek, bereikte dit cijfer een kwart van de CO<sub>2</sub>-uitstoot in vergelijking met de capaciteit van het volledige vrachtschip. Dit betekent dat PI Networks de benutting van de belly-capaciteit zodanig verhoogt dat de frequentie van volledige vrachtvliegtuigen kan worden verminderd, waardoor luchtvaartnetwerken duurzamer worden.

## Literatuur

72

- ACI EUROPE. (2017). Europe Airport Industry Connectivity Report 2017. 27th ACI EUROPE General Assembly. Paris: ACI EUROPE.
- Ballot, E., Barbarino, S., Bree, B. v., Liesa, F., Franklin, J., Hooft, D., ... Tavasszy, L. A. (2020). Roadmap to the Physical Internet. ALICE-ETP.
- Ballot, E., Montreuil, B., & Meller, R. (2014). The Physical Internet: The Network of Logistics Networks. Predit: La Documentation Française.
- Bombelli, A., Santos, B. F., & Tavasszy, L. (2020, June). Analysis of the air cargo transport network using a complex network theory perspective. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 138.
- Boonekamp, T., & Burghouwt, G. (2017). Measuring connectivity in the air freight industry. *Air Transport Management*, 61, 81-94.
- Burghouwt, G., & Redondi, R. (2013). Connectivity in air transport networks: an assessment of models and applications. *Journal of Transport Economics and Policy*, 47(1), 35-53.
- Fazili, M., Venkatadri, U., Cyrus, P., & Tajbakhsh, M. (2017). Physical Internet, conventional and hybrid logistic systems: a routing optimisation-based comparison using the Eastern Canada road network case study. *International Journal of Production Research*.
- Fleuti, E., & Maraini, S. (2016). Cargo Carbon Calculator Zurich Airport. Flughafen Zürich AG. [https://www.flughafen-zuerich.ch/~media/flughafenzh/dokumente/das\\_unternehmen/laerm\\_politik\\_und\\_umwelt/zurichairport\\_cargo\\_carbon\\_calculator.pdf](https://www.flughafen-zuerich.ch/~media/flughafenzh/dokumente/das_unternehmen/laerm_politik_und_umwelt/zurichairport_cargo_carbon_calculator.pdf), geraadpleegd op 5 oktober 2021
- Heinitz, F., Hirschberger, M., & Werstat, C. (2013). The role of road transport in scheduled air cargo networks. *Proced. Soc. Behav. Sci*, 104, 1198-1207.
- Hsu, C.-I., & Wang, C.-C. (2013). Reliability analysis of network design for a hub-and-spoke air cargo network. *International Journal of Logistics Research and Applications*.

- Lin, Y.-H., Meller, R. D., Ellis, K. P., Thomas, L. M., & Lombardi, B. J. (2014). A decomposition-based approach for the selection of standardized modular containers. *International Journal of Production Research*, 52(15), 4660-4672.
- Loadstar (2021), Air cargo load factors hit new heights, but yields not keeping pace, <https://theloadstar.com/air-cargo-load-factors-hit-new-heights-but-yields-not-keeping-pace/>, geraadpleegd op 5 oktober 2021.
- Mervis, J. (2014, June 6). The Information Highway Gets Physical. *Science*, 344(6188), 1104-1107.
- Montreuil, B. (2011). *Towards a Physical Internet: Meeting the Global Logistics Sustainability Grand Challenge*. Québec: Springer-Verlag.
- Montreuil, B., Ballot, E., & Tremblay, W. (2016). Modular Design of Physical Internet Transport, Handling and Packaging Containers. *Progress in Material Handling Research*.
- Montreuil, B., Meller, R., & Ballot, E. (2012, May). Physical Internet foundations. *Proc. INCOM Symp.*, 151-166.
- Morrel, P. S., & Klein, T. (2019). *Moving boxes by air* (2nd ed.). Abingdon, Oxon, England: Routledge.
- Mujica Mota, M., El Makhloufi, A., Boosten, G., Damme, D., & Hunt, E. (2017). *Is your belly empty? The analysis of the transition from full freighters to belly cargo of KLM Cargo*, Working paper.
- Pan, S., Ballot, E., Huang, G. Q., & Benoit, M. (2017, April 4). Physical Internet and Interconnected Logistics Services: Research and Applications. *International Journal of Production Research*, 2603-2609.
- Popescu, A., Keskinocak, P., & Mutawaly, P. a. (2011). The air cargo industry. *Eno Foundation for Transportation*, 209-237.
- Sarraj, R., Ballot, E., Pan, S., & Montreuil, B. (2012). *Analogies between Internet network and logistics service networks: challenges involved in the interconnection*. New York: Springer Science.
- Sarraj, R., Ballot, E., Pan, S., Hakimi, D., & Montreuil, B. (2014). Interconnected logistics networks and protocols: simulation-based efficiency assessment. *International Journal of Production Research*, 52(11), 3185-3208.
- Treiblmaier, H., Mirkovski, K., & Lowry, P. (2016). Conceptualizing the Physical Internet: Literature Review, Implications and Directoins for Future Research. *11th CSCMP Annual European Research Seminar*. Vienna.
- Venkatadri, U., Krishna, K. S., & Ülkü, M. A. (2016). *On Physical Internet Logistics: Modeling the Impact of Consolidation on Transportation and Inventory Costs*. *IEEE*.
- Verduijn, T., Vunderink, S., Bombelli, A., Tavasszy, L., Damme, D. v., Romero-Silva, R., & Mujica Mota, M. (2019). *Smartest Connected Cargo Airport Schiphol: ONderzoek naar inovaties die de logistieke prestaties van luchtvrachtketens op Schiphol versterken*. Amsterdam: Hogeschool van Amsterdam.