

Onbemande vrachtvliegtuigen: Een model voor een batenanalyse

Bacheloropdracht voor Technische Bedrijfskunde
19-9-2012

Sander Kremers
s0204773

Begeleiders:
Dr. J.M.G. Heerkens
Dr. T. Van der Burg

Samenvatting

Dit onderzoek is gedaan in opdracht van het Platform Onbemande Vrachtvliegtuigen. In dit onderzoek wordt een model opgesteld waarmee de baten van onbemande vrachtvliegtuigen (OVV's) kunnen worden vergeleken met traditionele methoden van transport. Onder traditionele methoden van transport worden in dit onderzoek schepen, vrachtwagens, treinen en bemande vliegtuigen verstaan.

Als eerste wordt, op basis van een literatuuronderzoek, een lijst opgesteld met alle relevante baten voor een transportmiddel. Uit dit onderzoek komt naar voren dat de baten kunnen worden gemeten aan de hand van de criteria transporttijd, betrouwbaarheid van de transporttijd, kans op verlies of schade van lading, milieubelasting en controle. Deze criteria worden dusdanig gedefinieerd, dat ze meetbaar en in de praktijk bruikbaar zijn. Omdat OVV's op het moment alleen op papier bestaan, wordt er voor alle criteria ook een methode gegeven om de baten van deze OVV's te kunnen schatten. Dit wordt gedaan door te kijken hoe de scores van de criteria voor bestaande transportmodi opgebouwd zijn, en welke van deze aspecten relevant zijn voor OVV's.

Nadat dit voor alle criteria gedaan is, wordt er gekeken hoe de scores op de verschillende criteria tot één eindoordeel kunnen worden geaggregeerd. Hiervoor worden de 'multiple criteria decision analysis' (MCDA) methoden SMART, AHP, TOPSIS en MAUT vergeleken. Voor elke MCDA methode worden de belangrijkste sterke en zwakke punten genoemd. Uit deze analyse blijkt dat SMART de beste methode is voor het gebruik in dit model. Tot slot wordt het gebruik van de ontworpen methode geïllustreerd aan de hand van een fictief voorbeeld.

Inleiding

Onbemande vrachtvliegtuigen zijn vliegtuigen, gemaakt voor het vervoer van vracht, die geen bemanning aan boord hebben. Mogelijk is er wel een 'piloot' die op afstand het vliegtuig bestuurt. Op het moment bestaan deze onbemande vrachtvliegtuigen (OVV's) nog niet.

De laatste jaren komen onbemande vliegtuigen regelmatig in het nieuws. Ze worden momenteel vooral ingezet voor militaire doeleinden en zijn beter bekend als 'drones'. Op dit moment worden onbemande vliegtuigen nog niet gebruikt voor het vervoer van vracht. Een deel van de technologie die nodig is voor OVV's bestaat al, omdat deze al is ontwikkeld voor de 'drones'. Het inzetten van deze vliegtuigen voor het vervoeren van (civiele) vracht is nieuw. Doordat OVV's een andere functie hebben dan 'drones', moet er ook nieuwe technologie ontwikkeld worden. Zo is het bijvoorbeeld nog niet duidelijk hoe OVV's het efficiëntst bestuurd kunnen worden.

Er zijn verschillende bestaande methoden om vracht te vervoeren en het is nog onduidelijk hoe OVV's presteren vergeleken met deze bestaande transportmodi. Er is al een model ontwikkeld om de kosten te vergelijken (Prent & Lugtig, 2012). Het doel van dit onderzoek is het ontwikkelen van een model om ook de baten te kunnen vergelijken. In dit verslag zal nu eerst een korte inleiding worden gegeven over de eigenschappen en de voordelen van OVV's, daarna zal de onderzoeksopzet voor dit onderzoek worden besproken. Hierna zal het batenmodel ontwikkeld worden aan de hand van de deelvragen en tot slot zal een voorbeeld gegeven worden om te illustreren hoe het model toegepast kan worden.

In dit onderzoek gaan we ervanuit dat een OVV lijkt op een passagiers vliegtuig. We kiezen hier voor een passagiersvliegtuig in plaats van een vrachtvliegtuig, omdat het grootste gedeelte van de luchtvracht in het laadruim van passagiersvliegtuigen wordt vervoerd als zogenaamde 'belly freight' (Lufthansa, 2012). Ook is er, in vergelijking tot passagiersvliegtuigen, maar zeer beperkte literatuur beschikbaar over vrachtvliegtuigen.

Door deze keuze gaan we er vanuit dat de baten van een OVV op dezelfde manier zijn opgebouwd als die van een passagiersvliegtuig. Het model is niet per definitie ongeschikt voor andere vormen van OVV's (zoals een zeppelin of een watervliegtuig), maar het is denkbaar dat de baten bij deze andere vormen anders zijn opgebouwd dan bij passagiersvliegtuigen.

In dit onderzoek zullen we de baten van OVV's gaan vergelijken met traditionele methoden van transport. De traditionele methoden van transport bestaan in dit onderzoek uit vervoer per trein, per schip, per vrachtwagen en als 'belly freight' in een passagiersvliegtuig.

Contents

Samenvatting.....	2
Inleiding	3
Wat zijn OVV's?	5
De probleemstelling	7
Onderzoeksdoel.....	7
Onderzoeksvragen.....	7
1. Baten	9
1.1 Onderzoeksmethode.....	9
1.2 Transporttijd.....	9
1.3 Betrouwbaarheid van levertijd.....	11
1.4 Kans op verlies of schade	12
1.5 Controle	12
1.5.1 Flexibiliteit	13
1.5.2 Controle over het tijdstip	13
1.6 Milieubelasting	14
1.7 Conclusie	16
2. Scores van de criteria	17
2.1 Transporttijd.....	17
2.2 Betrouwbaarheid.....	20
2.3 Milieubelasting	22
2.4 Controle	24
2.4.1 Flexibiliteit	24
2.4.2 Controle over het tijdstip	24
2.5 Verlies en schade.....	25
3. Een eindscore bepalen	26
3.1 MCDA.....	26
3.2 Keuze voor methode	32
4. Voorbeeld van de methode.....	33
5. Conclusie	35
Bronvermelding.....	36
Bijlage 1: Herleiding van de variantie door wind	38
Bijlage 2: Berekeningen bij het voorbeeld van de methode	39
Bijlage 3: Criteria uit de literatuur	41

Wat zijn OVV's?

Wat verstaan we eigenlijk onder OVV's en waarom zijn OVV's interessant? Om deze vragen te beantwoorden zullen we kort een aantal voordelen van OVV's ten opzichte van bemande vliegtuigen bespreken, zoals deze door het Platform onbemande vrachtvliegtuigen zijn geïdentificeerd (Heerkens, 2011). Daarna zullen we kort twee mogelijke typen OVV's bespreken.

Mogelijke voordelen

Bemanning

Er is geen bemanning nodig in de cockpit en in de cabine. Bij een bemande vlucht is er wel cockpit- en cabinepersoneel nodig. Ook moet er, in verband met werk- en rusttijdregelingen, reserve personeel mee bij lange vluchten. Bij OVV's is dit personeel niet nodig en kunnen de vliegtuigen vanaf de vliegtuigen vanaf een grondstation bestuurd worden. Één grondstation kan wellicht meerdere OVV's besturen.

Het feit dat er geen bemanning nodig is, brengt niet alleen een besparing op loonkosten met zich mee, maar zorgt er ook voor dat het makkelijker is om een planning te maken, omdat er geen personeel is dat terug moet naar hun thuisvluchthaven. Er zijn dus ook geen retourvluchten noodzakelijk en de vluchtroutes kunnen dus beter aangepast worden aan de vraag naar transport.

Brandstofverbruik

Het is met OVV's mogelijk om gemakkelijker langere vluchten te maken dan met bemande vliegtuigen. Wanneer er geen personen aan boord zijn, is er geen bezwaar om een vluchtduur te hebben van 2 dagen. Hierdoor kan er met een lagere kruissnelheid worden gevlogen. Dit is efficiënter en bespaart brandstof.

Constructie

Ook zullen de aerodynamische krachten op het vliegtuig, bij een lagere kruissnelheid, kleiner zijn, waardoor OVV's lichter geconstrueerd kunnen worden doordat er bijvoorbeeld geen (constructie-technisch) zware pijlstelling in de vleugels nodig is.

Omdat er geen personen aan boord zijn, is het ook niet nodig om een OVV te voorzien van een traditionele drukcabine. Dit maakt het mogelijk om OVV's lichter (en goedkoper) te maken.

Een andere reden waardoor voor OVV's een lichter airframe mogelijk is, is het feit dat er geen deuren en ramen voor passagiers nodig zijn. Deuren en ramen zorgen er namelijk voor dat de constructie minder sterk is, waardoor op andere plaatsen meer materiaal nodig is om voor voldoende sterkte te zorgen.

Verder is het mogelijk om de vorm van de romp te optimaliseren voor het vervoer van vracht. Als het vanuit een aerodynamisch perspectief geen grote problemen oplevert, zou een vierkante romp wellicht efficiënter zijn dan de traditionele romp. Ook kunnen er bijvoorbeeld deuren in de neus en in de staart worden gemaakt, zodat het mogelijk is efficiënter te laden en te lossen.

Er is ook minder zware en kostbare apparatuur nodig voor brandbestrijding. Omdat er geen mensen aanwezig zijn zou het vrachtruim wellicht kunnen worden gevuld met bijvoorbeeld stikstof.

Infrastructuur

Voor OVV's is slechts bescheiden infrastructuur nodig. Hierdoor is het mogelijk om speciale vliegvelden aan te leggen waar alleen onbemande vliegtuigen kunnen landen. Deze speciale vliegvelden kunnen naast verkeersknooppunten of industrieterreinen komen te liggen, waardoor er rechtstreeks vervoer kan plaatsvinden naar regio's die nu nog geen vliegveld hebben.

Deze voordelen ten opzichte van bemande vliegtuigen lijken het grootst, als de OVV's relatief klein zijn. Er is daarom door het POV besloten om zich te richten op relatief kleine OVV's, bedoeld voor de markt van pakketvervoer (Heerkens, 2011).

Mogelijke eigenschappen van OVV's

Door het POV worden een tweetal typen OVV's als het meest kansrijk beschouwd, namelijk de langeafstandsloper en de sprinter.

Langeafstandsloper

Een langeafstandsloper is een OVV met een kruissnelheid van rond de 400 km/uur dat een vliegbereik heeft tussen de 12.000 km en 15.000 km. Hiermee is een directe vlucht van West-Europa naar de Amerikaanse westkust of Japan mogelijk, met een significant kleinere lading dan dat van de bemande vliegtuigen met 'belly freight', die deze routes ook vliegen. Gedacht kan worden aan een betalende lading van 5 tot 10 ton. Een Boeing 777 vervoert op deze afstand bijvoorbeeld een betalende lading van 30 tot 50 ton (Boeing, 2012). Deze langeafstandsloper is interessant voor opkomende markten. Bijvoorbeeld steden in China die (voorlopig) kleine hoeveelheden goederen willen exporteren naar Europa of Amerika. Deze langeafstandslopers kunnen mogelijk ook worden ingezet op routes waar de frequentie van transport met 'bellyfreight' momenteel te laag is.

Sprinter

Een sprinter is een OVV met een kruissnelheid van wederom rond de 400 km/uur, maar met een vliegbereik van slechts 2000 km tot 3000 km en een betalende lading van 3 tot 5 ton. Ter vergelijking, een Airbus A320 (een passagiersvliegtuig voor 150 personen met een bereik van rond de 5000 km) vervoert een betalende lading van 18 ton (Airbus, 2012).

Dit type OVV is daarmee gericht op vervoer tussen West- en Centraal-Europa en West Rusland. De aanwezige infrastructuur in de laatste twee gebieden is vaak gebrekkig. Doordat OVV's efficiënt kleine volumes aan vracht kunnen vervoeren, opent dit voor lokale bedrijven wellicht nieuwe markten.

De probleemstelling

Het Platform Onbemande Vrachtvliegtuigen is bezig met het stimuleren van onderzoek naar de mogelijkheden van OVV's. Ook stimuleren zij de ontwikkeling van deze OVV's. Een deel van dit onderzoek is het analyseren van de kosten en baten van het nog te ontwerpen OVV. Prent & Lugtig (2012) hebben al een model gemaakt om het kostenaspect van deze vliegtuigen te beschrijven. Het doel van dit onderzoek is om inzicht te krijgen in de batenkant van de vergelijking.

Voordat hiermee begonnen kan worden, worden eerst het onderzoeksdoel en de onderzoeksvragen waarmee dit doel bereikt kan worden, vastgesteld. Daarna zal de samenhang van deze deelvragen en de onderzoeksmethodiek verder worden toegelicht.

Het doel van deze opdracht is te kijken op welke manier de baten van OVV's vergeleken kunnen worden met de baten van overige vormen van transport. De bestaande methoden voor het voorspellen van de baten van een nog te ontwerpen product kunnen mogelijk niet zonder problemen worden toegepast op OVV's. Ook is nog niet duidelijk welke aspecten relevant zijn voor een vergelijking met bestaande methoden van transport. Daarom kan de volgende probleemstelling worden opgesteld.

Hoe kunnen de baten van OVV's worden vergeleken met de baten van traditionele transportmodi?

Onderzoeksdoel

Het doel van dit onderzoek is het ontwerpen van een model dat een vergelijking maakt tussen de baten, zowel financieel als niet financieel, van OVV's en traditionele methoden van transport.

Onderzoeksvragen

Om de hoofdvraag te kunnen beantwoorden moeten eerst de volgende deelvragen worden beantwoord. De puntjes onder de deelvragen zullen in ieder geval aan bod komen. Deze deelvragen worden telkens kort toegelicht.

1. Welke baten zijn van belang om verschillende methoden van transport te vergelijken?

- *Wat wordt er verstaan onder baten?*
- *Welke criteria worden gebruikt voor de vergelijking tussen de verschillende vormen van transport?*
- *Zijn er andere, buiten de in de literatuur gevonden, criteria van belang?*

Voordat de baten in kaart kunnen worden gebracht is het van belang om deze duidelijk te definiëren en af te bakenen. Vervolgens kunnen de belangrijkste baten worden geïdentificeerd. Deze baten worden daarna geoperationaliseerd. Dat wil zeggen dat ze dusdanig worden gedefinieerd dat ze meetbaar zijn. Deze geoperationaliseerde baten, in het vervolg ook wel criteria genoemd, kunnen vervolgens gebruikt worden om de verschillende transportmodi te vergelijken.

Omdat OVV's op het moment niet bestaan, kan het ook zijn dat niet alle relevante aspecten aan bod komen in de bestaande modellen. De derde subvraag dient om deze aspecten in kaart te brengen. Om deze derde subvraag te beantwoorden zijn andere methoden nodig. Dit kan bijvoorbeeld worden gedaan met een stakeholder analyse of door een brainstorm sessie. Wanneer duidelijk is welke criteria er zijn, moet worden gekeken naar hoe deze samenhangen. Als er bijvoorbeeld twee criteria zijn, A en B, kan het zijn dat A uit B volgt. Het is van belang om te kijken hoe de criteria samenhangen, zodat overlap kan worden voorkomen. Wanneer A en B beide in het model zouden worden meegenomen zal A onbedoeld een zwaarder gewicht krijgen, omdat A zowel direct (door het A zelf) als indirect (door de gevolgen van B) meegenomen wordt.

2. Hoe kan de score op de criteria van de verschillende methoden van transport (inclusief OVV) worden bepaald?

- Hoe kunnen de scores op de criteria worden bepaald?
- Welke gegevens zijn er nodig om een vergelijking te maken?

Wanneer alle criteria in kaart zijn gebracht, kan worden gekeken hoe de verschillende vormen van transport scoren op de criteria. Van de traditionele vormen van transport zijn gegevens te vinden, maar van OVV's zijn er nog geen gegevens. In dit onderzoek wordt deze data niet verzameld, maar er zal wel aangegeven worden welke data nodig is voor het model. Het doel van deze deelvraag is het invullen van de gegevens in het model dat weergeeft hoe de scores op de gevonden criteria bepaald kunnen worden aan de hand van de eigenschappen, zoals vliegsnelheid en maximaal startgewicht, van een OVV.

3. Hoe kunnen de scores op de verschillende criteria worden geaggregeerd?

- Op welke manier kunnen de preferenties van de gebruiker worden meegenomen?
- Hoe kan dit model in de praktijk gebruikt worden?

Tijdens het beantwoorden van de laatste deelvraag zal een model worden opgesteld waarmee de verschillende methoden van transport vergeleken kunnen worden. Aan de hand van literatuur wordt bepaald hoe een dergelijk model eruit moet komen te zien en wat de beperkingen en mogelijkheden ervan zijn. Bij het opstellen van dit model wordt gebruik gemaakt van de relaties die bij deelvraag twee zijn gevonden.

De gevonden criteria zullen niet direct vergelijkbaar zijn, omdat ze allemaal in andere grootheden worden uitgedrukt. Hierdoor is er een methode nodig die het mogelijk maakt deze verschillende grootheden wél te vergelijken. Het gaat er hier dus vooral om hoe de verschillende scores geaggregeerd kunnen worden tot één eindoordeel.

Hierbij is het van belang dat er rekening gehouden kan worden met de preferenties van de gebruiker. Niet iedere gebruiker zal namelijk evenveel waarde hechten aan elk criterium. Het kan zijn dat de ene organisatie heel veel waarde hecht aan een snelle levering, terwijl een andere organisatie het belangrijker vindt dat een levering op exact de afgesproken tijd geleverd wordt.

1. Baten

Dit onderzoek richt zich op het maken van een model waarmee baten van OVV's kunnen worden vergeleken met baten van andere vormen van transport. Voordat er begonnen kan worden met het verzamelen van criteria en het opstellen van een model, zullen we eerst duidelijk definiëren wat we in dit onderzoek onder baten verstaan.

Een bate is iets dat nut of voordeel oplevert voor een persoon of organisatie. In het geval van transport moeten er goederen van A naar B worden vervoerd. Dit kan met verschillende transportmodi plaatsvinden en elke transportmodus heeft andere eigenschappen. In dit hoofdstuk zullen deze verschillende vergelijkingscriteria geïdentificeerd worden. Ook zullen de determinanten van deze criteria bepaald worden. In dit onderzoek zal alleen worden gekeken naar baten vanuit de optiek van de gebruiker van transport.

Het verschil tussen baten en kostenreducties is niet altijd even duidelijk. In dit verslag gaan we er echter van uit dat alle kostenreducties al opgenomen zijn in het kostenmodel voor OVV's. Een aantal van deze kostenreducties zullen wel kort genoemd worden, maar zullen hier niet verder uitgewerkt worden.

1.1 Onderzoeksmethode

Om tot een volledige lijst met baten te komen is er gebruik gemaakt van twee methoden. Enerzijds is er gezocht in de literatuur naar de redenen van de keuze voor een bepaalde transportmodus. Anderzijds is er een brainstormsessie gehouden met studenten Technische Bedrijfskunde volgens de regels van Hicks (2004). Aan deze studenten is gevraagd om te brainstormen over de mogelijke redenen waarom organisaties voor een bepaalde vorm van transport zouden kiezen. Op het criterium milieubelasting na, kwamen de criteria van de brainstormsessie overeen met die uit de literatuur. Om zo volledig mogelijk te zijn, wordt het criterium milieubelasting wel meegenomen in dit onderzoek. In Bijlage 3 is weergegeven welke criteria door de verschillende auteurs zijn geïdentificeerd.

Door de zoektocht naar criteria op twee verschillende manieren uit te voeren, en doordat de resultaten van deze twee methoden overeenkomen, kunnen we er vanuit gaan dat de gevonden criteria correct en volledig zijn.

In het resterende deel van dit hoofdstuk zal per criterium worden besproken waarom een organisatie het belangrijk vindt, hoe het criterium geoperationaliseerd wordt en van welke variabelen de score van het criterium af hangt. Tot slot zullen nog enkele dingen genoemd worden die niet worden meegenomen in het model.

1.2 Transporttijd

De transporttijd is een belangrijk criterium. Ze hangt vooral af van de snelheid waarmee een vervoersmiddel kan reizen. Een kortere transporttijd heeft een snellere levering als gevolg. Een snellere levering heeft vele voordelen. Zo zal er minder voorraad hoeven worden aangehouden, en zal de cycle-time van het productieproces gereduceerd worden (Thomas, 1990). Dit zorgt er ook voor dat een aantal andere voordelen gerealiseerd kunnen worden (Lagoudis, Lalwani, Naim, & King, 2002):

- Betere demand forecasting.
- Sneller ontdekken van defecten in leveringen.
- Mogelijk om sneller te reageren op de markt.

De transporttijd kan worden opgesplitst in de tijd nodig voor het laden en lossen en de directe transporttijd (Lingaitiene, 2008). De directe transporttijd definiëren we als de tijd tussen het vertrek en de aankomst van het vervoersmiddel. Voor OVV's betekent dit specifiek dat vanaf het moment

dat de motor aan wordt gezet, de klok gaat lopen. Stationair draaien, taxiën e.d. tellen dus allemaal mee. Deze directe transporttijd voor vliegtuigen wordt bepaald door de vluchttijd en de tijd nodig voor de start en landing. De transporttijd die in dit onderzoek wordt gebruikt is een fictieve grootte. In de praktijk zal de transporttijd stochastisch zijn. Dit wil zeggen dat voor aanvang van een transport niet mogelijk is exact te voorspellen hoe lang het duurt. In dit onderzoek wordt een deterministische transporttijd gebruikt, dat wil zeggen dat dit stochastische gedeelte niet in de transporttijd wordt meegenomen, maar in een apart criterium. Dit is gedaan zodat het mogelijk is aparte gewichten toe te kennen aan deze criteria.

Vluchttijd

De vluchttijd kan eenvoudig worden bepaald door de afstand tussen de vertreklocatie en de aankomstlocatie te delen door de kruissnelheid. De kruissnelheid is een ontwerpparameter van het te ontwerpen vliegtuig.

Tijd nodig voor start en landing

Voordat een vliegtuig kan vertrekken moet het eerst van de terminal naar de startbaan rijden. De starttijd kan dus in twee delen worden gesplitst, namelijk de tijd tussen het starten van de motoren en het bereiken van de startbaan, en de tijd tussen het bereiken van de startbaan en kruishoogte. Voor de landing kan eenzelfde onderscheid worden gemaakt.

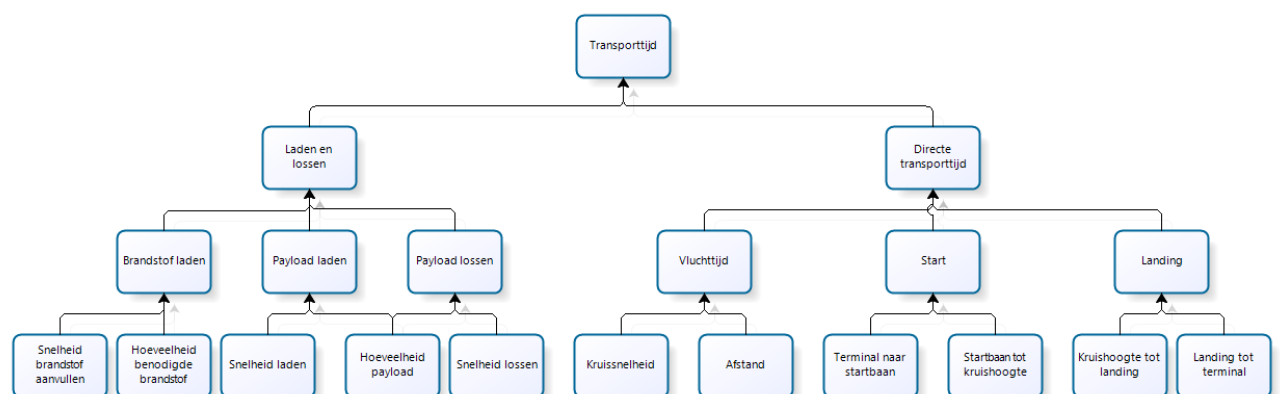
Laden en lossen

Tijdens het laden moet zowel de payload als de brandstof in het voertuig geladen worden. Er kan pas vertrokken worden op het moment dat beide activiteiten zijn afgerond. De tijd die nodig is voor het laden van het voertuig, is dus het maximum van de laadtijd van de payload en de brandstof. Het is wellicht ook mogelijk om (een deel van) de brandstoftanks al te vullen gedurende het lossen van de payload.

De hoeveelheid te laden of lossen goederen gedeeld door de snelheid hiervan geeft de benodigde tijd voor het laden en lossen.

Het model

In Figuur 1 staan de determinanten van de transporttijd in een model weergegeven. Hoe verder je naar onder gaat in het model, des te specifieker zijn de variabelen gericht op het transport met behulp van vliegtuigen. De bovenste lagen zijn van toepassing op alle vormen van transport.



Figuur 1: Model transporttijd

1.3 Betrouwbaarheid van levertijd

Ook de betrouwbaarheid van de levertijd is een belangrijk criterium. In de literatuur worden vele redenen genoemd waarom een levertijd betrouwbaar moet zijn. Enkele van de belangrijkste redenen zijn (Fowkes & Frimin, 2004):

- Aansluiting bij Just-in-Time processen
- Aansluiting bij Hub-and-Spoke netwerken
- Betrouwbaarheid van de (warehouse) planning

Het is niet relevant om hier alle redenen op te sommen, omdat dit niet het doel van dit onderzoek is en dit geen verder inzicht geeft in de determinanten van betrouwbaarheid. De hier gegeven redenen zijn voldoende om aan te tonen dat het zinvol is om het criterium betrouwbaarheid mee te nemen in het model.

Een te late levering, kan dus grote gevolgen hebben voor het vervolg van een productieproces. Er zijn vele redenen waarom een levering te vroeg of te laat kan komen. Een vrachtwagen kan in de file komen te staan of pech hebben, een schip of vliegtuig kan problemen hebben met slechte weersomstandigheden.

Wanneer de levertijd erg onzeker is, zullen grotere veiligheidsvoorraden moeten worden aangehouden. Deze veiligheidsvoorraden kosten geld en ruimte. Organisaties willen de grootte van deze veiligheidsvoorraad dus minimaliseren.

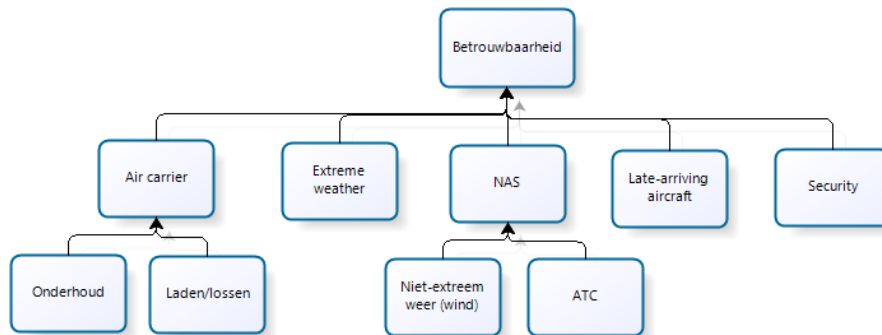
Om de betrouwbaarheid van een transportmodus te meten, kan het beste gekeken worden naar de variantiecoëfficiënt (Allen, Mahmoud, & McNeil, 1985) (Halse, Samstad, & Killa, 2010). De variantiecoëfficiënt is de variantie gedeeld door het kwadraat van de gemiddelde levertijd. We zullen nu bekijken door welke redenen vertraging opgelopen kan worden tijdens transport.

Er zijn verschillende mogelijke redenen voor vertraging van een vliegtuig. Alle vertraging kan worden opgedeeld in de volgende categorieën (Bureau of Transportation Statistics, 2012):

- Air carrier: Hieronder valt alles wat binnen de controle van de luchtvaartmaatschappij is. Dit zijn dingen als onderhoudsproblemen en het laden of lossen van bagage of goederen
- Extreme weather: Extreme weersomstandigheden waardoor een vlucht geannuleerd wordt of vertraging door oploopt.
- National aviation system (NAS): Hieronder valt vertraging door niet-extreem weer, vertraging door luchthaven operations en air traffic control (ATC).
- Late-arriving aircraft: Vertraging doordat de vorige vlucht te laat is gearriveerd, waardoor de volgende vlucht ook vertraging oploopt.
- Security: Vertraging door veiligheidsredenen.

Het model

In Figuur 2 staat het model voor de betrouwbaarheid van de levertijd weergegeven. In de bovenste laag staat de betrouwbaarheid van de levertijd weergegeven, de lagere niveaus zijn alleen toepasbaar op vervoer met vliegtuigen.



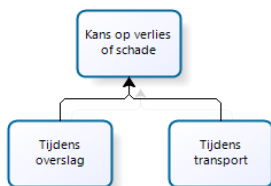
Powered by
bizagi
Modeler

Figuur 2: Model betrouwbaarheid levertijd

1.4 Kans op verlies of schade

In de transportwereld komt het wel eens voor dat een (deel van een) zending beschadigd of verloren raakt. Het wordt in een aantal onderzoeken uit de literatuur wel als verklarende variabele gebruikt, maar heeft over het algemeen geen grote invloed op de keuze voor een transportmodus (Cullinane & Toy, 2000). Bij een aantal specifieke goederen speelt de veiligheid tijdens transport wel een belangrijke rol (Jeffs & Hills, 1990). Wanneer er bijvoorbeeld gevaarlijke stoffen worden vervoerd, moet dit wel veilig gebeuren. Het is in dit stadium van de ontwikkeling van OVV's nog onduidelijk of het wenselijk is om deze stoffen met OVV's te vervoeren. We zullen het transport van gevaarlijke stoffen daarom buiten beschouwing laten.

Het vermoeden is er dat er een verband bestaat tussen overslag en verlies of schade, omdat er tijdens het transport zelf weinig kan gebeuren. In Figuur 3 staat dit in het model weergegeven.



Powered by
bizagi
Modeler

Figuur 3: Model verlies/schade

1.5 Controle

Jeffs & Hills (1990) hebben de hoeveelheid controle die kan worden uitgeoefend op een methode van transport ook als baat geïdentificeerd. Met controle wordt hierbij de mate waarin een leverancier of ontvanger kan bepalen wanneer en vanaf welke locatie het transport plaats vindt bedoeld. Als voorbeeld bekijken we een fabriek die met een trein goederen transporteert. Deze fabriek is erbij gebaat dat deze goederen zo dicht mogelijk bij de fabriek kunnen worden ingeladen en dat ze niet eerst kilometers vervoerd moeten worden. Ook levert het qua planning voordelen op wanneer de fabriek zelf kan bepalen wanneer de trein vertrekt, in plaats van dat deze volgens een vaste dienstregeling rijdt. Bovendien levert het voor een organisatie voordeel op wanneer het mogelijk is om een ongeplande (last-minute) levering plaats te laden vinden.

Uit de definitie wordt al direct duidelijk dat controle opgesplitst kan worden in controle over het tijdstip van het transport en controle over de locatie van transport.

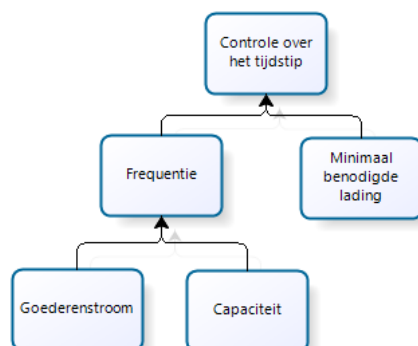
1.5.1 Flexibiliteit

De controle over de locatie van transport houdt in dat een transportmiddel van veel locaties moet kunnen vertrekken en op veel locaties moet kunnen aankomen. De mate van controle over de aankomst en vertreklocatie hangt dus direct af van de faciliteiten die nodig zijn om het mogelijk te maken dat een OVV kan vertrekken en landen op een bepaalde locatie. Een OVV heeft een aantal basisfaciliteiten nodig om te kunnen opereren vanaf een bepaalde locatie. Zo moet er in ieder geval een start- en landingsbaan aanwezig zijn en moet er de mogelijkheid zijn om nieuwe brandstof te verkrijgen. De exacte eigenschappen van de benodigde start- en landingsbaan zijn afhankelijk van het gekozen ontwerp. Een vertrek en aankomst locatie zo dicht mogelijk bij het terrein van de organisatie hebben kan belangrijk zijn, omdat dit meer flexibiliteit biedt. Met flexibiliteit wordt hier de mogelijkheid tot het ontvangen of verzenden van ongeplande leveringen bedoeld. Het is makkelijker een ongeplande levering plaats te laten vinden als een bestelling op het terrein van de ontvanger geleverd kan worden, dan wanneer het geleverd wordt op een (lucht)haven op een grote afstand van deze organisatie. In dit laatste geval moet namelijk ook nog transport voor de goederen worden geregeld voor de laatste kilometers.

Het is hierbij van belang om op te merken dat flexibiliteit deels al wordt meegenomen in andere criteria, zoals transporttijd en frequentie. Omdat de mogelijkheid bestaat dat sommige organisaties veel belang hechten aan flexibiliteit, nemen we dit criterium, ondanks de overlap, toch mee in het model. Wanneer flexibiliteit voor een specifieke organisatie niet erg belangrijk is, is mogelijk om dit criterium een gewicht van nul te geven.

1.5.2 Controle over het tijdstip

De controle over het tijdstip van vertrek en aankomst kunnen we opsplitsen in twee sub-criteria. Enerzijds is er de frequentie van transport tussen twee locaties. Wanneer deze frequentie hoog is zal een gebruiker de levering dicht bij het voor hem ideale tijdstip kunnen laten arriveren. De frequentie hangt af van de totale goederenstroom tussen deze locaties die met een bepaald vervoersmiddel plaats vindt en de beschikbaarheid van capaciteit van dit vervoersmiddel. Er bestaat echter ook de mogelijkheid om een extra voertuig in te zetten om een ongeplande levering plaats te laten vinden. In hoeverre dit mogelijk is hangt af van de minimaal benodigde lading om rendabel een extra transport plaats te laten vinden. Dit verschilt per transportmodus; zo zal een schip bijvoorbeeld veel meer lading nodig hebben voor een rendabele levering dan een vrachtwagen. Het model voor controle over het tijdstip staat weergegeven in figuur 4.

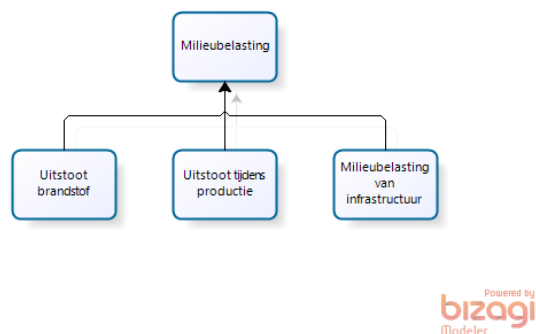


Figuur 4: Model controle over het tijdstip

1.6 Milieubelasting

De belasting op het milieu, gemeten in CO₂ uitstoot, verschilt veel tussen verschillende modi van transport (Facanha & Horvath, 2006). Er is in de wereld steeds meer aandacht voor de belasting van het milieu door menselijke invloeden, en veel organisaties willen een 'groen' imago hebben. Milieubelasting zou ook als niet-financiële koste kunnen worden gezien, maar omdat het bestaande kostenmodel voor OVV's alleen de financiële kosten bekijkt, wordt milieubelasting meegenomen in het batenmodel.

De totale invloed van transport op het milieu wordt voor 70 tot 75 procent bepaald door de verbranding van brandstof (Facanha & Horvath, 2006) (Spielman & Scholz, 2005). Het overige deel wordt veroorzaakt door de productie van de voertuigen en het aanleggen van infrastructuur. In Figuur 5 staat dit weergegeven.



Figuur 5: Model milieubelasting

Met dit criterium worden enkel de niet-financiële effecten van milieubelasting bedoeld. In het kostenmodel wordt emissierechten al meegenomen. Wanneer een organisatie dus alleen geïnteresseerd is in de CO₂ uitstoot vanwege financiële redenen, moet dit criterium niet worden meegenomen.

Investering

Het gebruik van OVV's voor het vervoer van vracht zal op den duur ook nieuwe markten creëren. Er is relatief weinig nodig om een locatie goed bereikbaar te maken met OVV's. Er is bijvoorbeeld wel een landingsbaan, command&control faciliteiten en apparatuur voor laden en lossen nodig. Dit is veel minder dan wat er nodig is om een passagiersvliegtuig te laten landen. Voor een passagiersvliegtuig zijn ook nog vele faciliteiten voor de passagiers nodig. Hierbij is te denken aan een terminal, beveiliging en douane en infrastructuur zodat de passagiers ook het vliegveld kunnen verlaten. Tevens kunnen OVV's locaties verbinden waartussen geen (voldoende) vraag is naar passagierstransport.

De kosten de faciliteiten voor OVV's aan te leggen staan in geen verhouding met de kosten die nodig zijn om een kanaal of spoorweg aan te leggen om een locatie bereikbaar te maken met boten of treinen.

De hoogte van deze investering zal van belangrijke invloed zijn op de beslissing om OVV's in plaats van een andere transportmodus te gebruiken. Deze investeringskosten zijn niet opgenomen in het bestaande kostenmodel, omdat dit model enkel gebruik maakt van 'direct operating costs'. Maar omdat deze investeringskosten niet onder de baten vallen, zullen deze in dit onderzoek niet verder uitgewerkt worden.

Aan deze investeringen hangt overigens ook een risico. Als kleine industriegebieden die worden bediend door OVV's groeien, zal de infrastructuur hier ook verbeteren, waardoor de OVV's mogelijk uit de markt worden geconcentreerd door alternatieve vormen van transport die voorheen niet de mogelijkheid hadden om deze gebieden te bedienen. Dit is een effect waar rekening mee gehouden moet worden voor de toekomst, maar in dit onderzoek zullen we hier verder geen aandacht aan schenken.

Extra baten uit hogere bezettingsgraad

Ongeveer 30% van alle directe kosten voor een vliegtuig bestaan uit vaste lasten (Curran, 2003). Een passagiersvliegtuig staat een groot deel van de dag aan de grond. Een OVV zou meer uren per dag gebruikt kunnen worden dan een passagiersvliegtuig, omdat er geen rekening gehouden hoeft te worden met rusttijden van de crew. Ook hoeft er bij OVV's geen rekening te worden gehouden met een crew die wanneer ze gevlogen hebben, ook weer terug moeten naar hun thuisbasis. Hierdoor zouden OVV's efficiënter kunnen worden ingepland en zouden de vaste lasten uitgesmeerd kunnen worden over meer vluchten dan bij een passagiersvliegtuig.

Dit is in feite geen echte baat, maar een reductie in kosten. We gaan er daarom vanuit dat deze reductie in kosten in het bestaande kostenmodel kan worden gemodelleerd. Aan dit effect zal in dit onderzoek verder geen aandacht worden besteed.

Geluidsoverlast voor omgeving

Vliegtuigen zorgen voor geluidsoverlast in de omgeving van het vliegveld. Geluidsoverlast wordt in het model niet meegenomen. Voor de omgeving van de vliegvelden is het wel een bate om geluidsoverlast te minimaliseren, maar voor de gebruiker is het veel minder belangrijk. Daarnaast is het is erg lastig te voorspellen hoeveel overlast OVV's zullen veroorzaken. Dat ze geluid veroorzaken is duidelijk, maar hoeveel geluid dit is en wanneer dit geluid zorgt voor overlast is erg moeilijk te bepalen. We geluidsoverlast voor de omgeving wordt daarom niet meegenomen in dit model. Het is wel aan te raden verder onderzoek te doen om te bepalen of de geluidsoverlast die OVV's veroorzaken binnen de wet valt.

1.7 Conclusie

In het voorgaande deel is een causaal model opgesteld voor de transporttijd, de betrouwbaarheid van de levertijd, de controle, de kans op verlies en schade en de milieubelasting. Om tot deze baten te komen is er enerzijds gezocht in de literatuur naar de eigenschappen van de verschillende transportmodi en naar de redenen waarom organisaties kiezen voor een bepaalde modus. Anderzijds is er een brainstormsessie gehouden met een tweetal studiegenoten. Er is aan deze studenten Technische Bedrijfskunde gevraagd, volgens de regels van Hicks (2004), te brainstormen over de baten van transportmodi. Uit deze brainstormsessie zijn veelal dezelfde baten tevoorschijn gekomen als uit de literatuur. Het criterium milieubelasting is het enige nieuwe criterium dat hieruit voort is gekomen.

Door het probleem op meerdere manieren te benaderen, zijn de baten zo compleet mogelijk. Er is gekeken van welke variabelen deze criteria afhangen, dit is in Figuur 1 tot en met Figuur 5 weergegeven. In het volgende deel zullen we bekijken hoe we de waarde van deze variabelen kunnen bepalen. Aan de hand daarvan zullen totaalscores op de vijf criteria worden bepaald.

2. Scores van de criteria

In dit deel zal een methode worden gepresenteerd om de scores op de hiervoor genoemde criteria te bepalen. We zullen OVV's vergelijken met bemande passagiersvliegtuigen. Dit wordt gedaan omdat het grootste gedeelte van de luchtvracht als 'belly-freight' wordt vervoerd in de buik van een passagiersvliegtuig (Lufthansa, 2012) en omdat er simpelweg maar zeer weinig onderzoek is gedaan naar vrachtvliegtuigen op het gebied van operations management. Hierdoor is het lastig gegevens te vinden om een vergelijking op te baseren.

2.1 Transporttijd

2.1.1 Directe transporttijd

2.1.1.1 Trein, Schip, vrachtwagen

De tijd die nodig is voor vertrek en aankomst bij het transport met schip, trein of vrachtwagen is te verwaarlozen vergeleken bij de tijd die een vliegtuig nodig heeft. Bij deze drie transportmodi kan de directe transporttijd dus worden bepaald door de (kruis)snelheid met de af te leggen afstand te vermenigvuldigen. In Tabel 1 staat de kruissnelheid van deze transportmodi weergegeven.

Voor vrachtwagenchauffeurs staat in de wet voorgeschreven dat er na een bepaalde tijd rust gehouden moet worden. De exacte regels hiervoor zijn erg complex, maar in het meest simpele geval kan er vanuit worden gegaan dat er elke 4,5 uur 45 minuten pauze gehouden moet worden, en dat er elke dag 11 uur rust gehouden moet worden. Dit komt erop neer dat er per dag effectief 11,5 uur gereden kan worden en dus 12,5 uur gerust wordt. (Transporters' Friends, 2012)

Wanneer de directe transporttijd van verschillende modi wordt vergeleken tussen twee locaties, is de af te leggen afstand niet gelijk voor alle transportmodi. De afstand die afgelegd moet worden per weg, spoor en over het water, kan namelijk sterk verschillen.

$$T_{x,dir} = \frac{a_x}{V_{cr}} + T_{rust}$$

T_{dir} : directe transporttijd van transportmodus x

V_{cr} : (kruis)snelheid

a: af te leggen afstand met transportmodus x

T_{rust} : Rusttijd van de chauffeur (alleen voor vrachtwagens)

Transportmodus	(kruis)snelheid
Trein	90 km/uur (ProRail, 2012)
Schip	33,3 tot 37 km/uur (Rodrigue, 2011)
Vrachtwagen	80 tot 90 km/uur, afhankelijk van lokale maximum snelheid (Schürmann & Talaat, 2000)

Tabel 1: Kruissnelheid van de verschillende transportmodi

2.1.1.2 Bemande vliegtuigen

Voor bemande vliegtuigen moet wel rekening gehouden worden met de tijd die nodig is voor het starten en landen, omdat dit wel een significant aandeel heeft in de transporttijd. Na het laden van het vliegtuig, zal het moeten taxiën naar de startbaan voordat het kan vertrekken. Hierna zal het vliegtuig gaan opstijgen. We gaan er in ons model vanuit dat de afstand die afgelegd moet worden gelijk is aan de afstand (gemeten over een bol) van de vertrek en aankomst locatie. Het stijgen naar en dalen van kruishoogte wordt dus verwaarloosd.

De tijd die nodig is voor het taxiën is afhankelijk van het gekozen vliegveld. Op drukke vliegvelden duurt het taxiën langer. Deze relatie is in Tabel 2 te zien. Voor de bemande vliegtuigen kan de gemiddelde taxi tijd gebruikt worden.

	Average minutes		% of total operations
	Taxi-Out	Taxi-In	
Large Hub	18,5	7,8	58,8
Medium Hub	13,4	5,3	18,1
Small Hub	12,7	4,7	9,8
Non-Hub	12,0	4,3	13,3
Total	16,7	6,9	100,0

Tabel 2: Gemiddelde taxi tijden (Bureau of Transportation Statistics, 2007)

Bij het bepalen van de kruissnelheid van bemande vliegtuigen moet onderscheid worden gemaakt tussen vliegtuigen met een propeller aandrijving en vliegtuigen met een jet aandrijving.

Propellervliegtuigen hebben een lagere kruissnelheid en kruishoogte. Een typische waarde voor de kruissnelheid van vliegtuigen met een jet aandrijving is die van de Boeing-777. Deze is ongeveer 900 km/uur (Boeing, 2012). Een typische waarde voor de kruissnelheid van een propellervliegtuig is die van de ATR-72, namelijk 500 km/uur (ATR, 2012).

$$T_{dir} = \frac{a}{v_{cr}} + T_{taxi,out} + T_{taxi,in}$$

T_{dir} : directe transporttijd

v_{cr} : (kruis)snelheid

a : af te leggen afstand

$T_{taxi,out}$: tijd vanaf verlaten van de gate tot takeoff

$T_{taxi,in}$: tijd vanaf touchdown tot de gate

2.1.1.3 OVV's

Het bepalen van de directe transporttijd voor OVV's kan op dezelfde manier als bij bemande vliegtuigen. De waarden van de variabelen zullen waarschijnlijk wel verschillen. OVV's zullen waarschijnlijk niet vanaf grote of medium hubs vliegen, maar vanaf de kleinere, of special voor OVV's aangelegde vliegvelden. Hierdoor zal de tijd die nodig is voor het taxiën aanzienlijk lager zijn. Een conservatieve schatting voor de benodigde taxi-tijd is de taxi-tijd op non-hubs. In Tabel 2 is te zien dat deze 12 minuten is voor taxi-out en 4,3 minuten voor taxi-in.

De kruissnelheid van een OVV kan significant lager zijn dan die voor bemande vliegtuigen. Door langzamer te vliegen kan brandstof worden bepaald. Deze kruissnelheid is een belangrijke ontwerpparameter en zal pas bij het ontwerpproces bepaald worden. Een voorlopige schatting voor de kruissnelheid van OVV's is 400 km/uur (Heerkens, 2011).

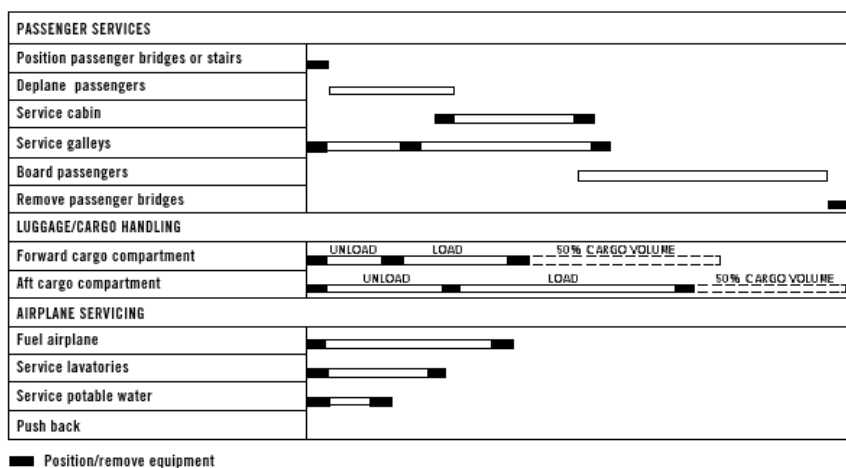
2.1.2 Laden en lossen

2.1.2.1 Trein, Schip, Vrachtwagen

De turnaround tijd van een gemiddelde vrachtwagen is ongeveer 30 minuten (PBLIS, 2012) (Eye for transport, 2011). De turnaround tijd van een vrachtschip in de haven van Rotterdam is in 2011 gemiddeld 4 uur en 27 minuten (Port of Rotterdam, 2011). Dit kan per haven verschillen, maar de turnaround tijd van een schip zal in ieder geval van deze orde grote zijn. Over de turnaround tijd van een vrachttrein is weinig te vinden, maar naar verwachting ligt deze ergens tussen de turnaround tijd van een vrachtwagen en een vrachtschip. Een schatting voor de turnaround tijd van een trein is daarom 2 uur.

2.1.2.2 Bemande vliegtuigen

De tijd die nodig is voor laden en lossen wordt gegeven door de turnaround time. Deze turnaround tijd is de tijd dat het vliegtuig bij de gate staat. Er moeten gedurende die tijd verschillende dingen gebeuren. In Figuur 6 staat dit weergegeven. De lengte van de balken geeft aan hoeveel tijd een bepaalde handeling kost. Zoals te zien in deze figuur, kunnen verschillende handelingen tegelijk worden uitgevoerd. Afhankelijk van het type vliegtuig en de airline, is de turnaround tijd van een passagiersvliegtuig tussen de 30 en 60 minuten (Marelli, Mattocks, & Merry, 1998). Dit is een theoretische turnaround tijd, die in de praktijk vaak niet gehaald wordt, omdat vliegtuigen op elkaar moeten wachten in een hub-and-spoke systeem. Omdat OVV's op het moment ook alleen in theorie bestaan, en de prestaties van OVV's in de praktijk misschien ook wel verschillen van de theorie, zullen we in dit model gebruik maken van de theoretische waarden van de variabelen.



Figuur 6: Turnaround tijd (Marelli, Mattocks, & Merry, 1998)

2.1.2.3 OVV's

De turnaround tijd (de tijd nodig voor het laden en lossen) is bij OVV's significant anders dan bij bemande vliegtuigen. Omdat er geen passagiers aan boord zijn, hoeven veel handelingen uit Figuur 6 niet worden uitgevoerd. Wat er overblijft is enkel het hervullen van de brandstof en het laden en lossen van de goederen. Er kan vanuit worden gegaan dat het hervullen van de brandstof ongeveer even snel gaat als bij bemande vliegtuigen, maar voor het laden en lossen van de lading zal dit niet het geval zijn. OVV's kunnen dusdanig worden ontworpen dat het mogelijk is om efficiënter te laden en te lossen dan bij bemande vliegtuigen. Er zouden bijvoorbeeld meer 'deuren' gemaakt kunnen worden voor het laden, zonder dat dit ten koste gaat van de structurele sterkte van het vliegtuig, omdat er geen drukcabine nodig is.

Ook zal alle lading bij OVV's op containers of pallets staan en hoeven er, in tegenstelling tot bij bellyfreight, geen individuele koffers ingeladen te worden. Dit zal waarschijnlijk voor tijdswinst zorgen. Het laden van koffers en vracht gebeurt bij passagiersvliegtuigen tegelijk in twee

verschillende vrachtruimen. Bij OVV's kan er ook gebruik gemaakt worden van meerdere vrachtruimen die tegelijkertijd geladen kunnen worden.

Tijdens de turnaround periode vindt er ook line-maintenance plaats. Dit bestaat uit klein onderhoud en technische controles. In de praktijk is dit geen bottleneck, behalve wanneer er onverwachte problemen optreden. Omdat de onverwachte problemen worden meegenomen in de betrouwbaarheid, en er geen reden is om aan te nemen dat de line-maintenance bij OVV's wel een bottleneck zal zijn, zal line-maintenance niet worden meegenomen in het model.

De waarde van de turnaround tijd is te bepalen aan de hand van de volgende formule:

$$T_{turn} = \max\left\{\frac{h_{fuel}}{s_{fuel}}, \frac{h_{pay}}{s_{pay}}\right\}$$

T_{turn} : turnaround tijd

h_{fuel} : hoeveelheid aan te vullen brandstof

h_{cargo} : hoeveelheid te laden en lossen payload

s_{fuel} : snelheid van het bijvullen van brandstof

s_{cargo} : snelheid van het laden en lossen

2.2 Betrouwbaarheid

2.2.1 Trein, schip, vrachtwagen, bemand vliegtuig

De gegevens die nodig zijn om de betrouwbaarheid van de verschillende transportmodi te bepalen, zijn niet direct te vinden. Daarom zal er hier enkel een methode worden beschreven om de betrouwbaarheid te bepalen.

De betrouwbaarheid wordt gemeten als de variantiecoëfficiënt van de levertijd. Wanneer er gegevens beschikbaar zijn over de geplande levertijd en de gerealiseerde levertijd op een bepaalde route, is de variantie als volgt te bepalen:

$$Var = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ELt - Lt_i)^2$$

n : aantal datapunten

i : datapunt i

ELt_i : De verwachte levertijd

Lt_i : De gerealiseerde levertijd van de i -de levering

De variantiecoëfficiënt is dan simpel te bepalen door de variantie te delen door het kwadraat van de verwachte levertijd. Op deze manier kan de betrouwbaarheid van de traditionele methoden van transport worden bepaald.

Voor OVV's is het echter onmogelijk om de betrouwbaarheid op deze manier te bepalen, omdat er geen gegevens beschikbaar zijn. We zullen daarom aan de hand van een vergelijking met bemande vliegtuigen de betrouwbaarheid van OVV's schatten.

2.2.2 OVV's

Wanneer we er vanuit gaan dat de vertraging per vlucht toegeschreven kan worden aan één of meerdere van de, in het vorige hoofdstuk beschreven, oorzaken, kan de variantie als gevolg van elk van deze oorzaken worden bepaald voor bemande vliegtuigen. De variantie van de OVV's kan dan op de volgende manier worden uitgedrukt:

$$Var_{x,ovv} = Var_{x,bemand} * \alpha_x$$

$Var_{x,ovv}$: De variantie als gevolg van oorzaak x voor OVV's.

$Var_{x,bemand}$: De variantie als gevolg van oorzaak x voor bemande vliegtuigen.

α_x : Onbekende coëfficiënt

De coëfficiënten α geven de verhouding aan tussen de vertraging die een bemand vliegtuig van een bepaalde oorzaak ondervindt ten opzichte van de vertraging die een OVV hiervan ondervindt.

Wanneer een OVV bijvoorbeeld minder vertraging heeft door bezette start- of landingsbanen, omdat het vanaf minder drukke vliegvelden opereert, zal de α voor deze oorzaak dus kleiner zijn dan 1. Deze coëfficiënten kunnen aan de hand van het ontwerp voor het OVV geschat worden.

De variantie als gevolg van de wind kan wel worden geschat zonder subjectieve gebruikersimput. De herleiding van deze formule is te vinden in Bijlage 1:

$$Var_{ovv,wind} = Var_{bemand,wind} * \left(\frac{V_{cr,bemand}}{V_{cr,ovv}}\right)^2$$

$V_{cr,bemand}$: De cruisesnelheid van het bemande vliegtuig

$V_{cr,ovv}$: De cruisesnelheid van het OVV

De totale variantiecoëfficiënt kan dan worden bepaald door de varianties van alle afzonderlijke oorzaken op te tellen en dit te delen door het kwadraat van de verwachte transporttijd, zoals deze eerder in dit onderzoek is beschreven.

Als een vlucht bijvoorbeeld 2 uur vertraging heeft op een verwachte transporttijd van 6 uur, zal de variantie als gevolg hiervan 4 uur² zijn. Als 50% hiervan wordt veroorzaakt door ATC en de andere 50% door de wind, is de variantie als gevolg van ATC dus $\frac{1}{2} * 4$ uur² en de variantie als gevolg van de wind ook $\frac{1}{2} * 4$ uur².

Wanneer een variantie wordt opgesplitst moet dit op deze manier gebeuren. Het is onjuist om te stellen dat de vertraging van 2 uur is opgebouwd uit een vertraging van 1 uur als gevolg van ATC, met als resultaat een variantie van 1 uur² en een vertraging van 1 uur door de wind met ook een variantie van 1 uur² als gevolg. Op deze manier zou de som van de varianties van de individuele oorzaken namelijk niet meer hetzelfde zijn als de totale variantie.

2.3 Milieubelasting

2.3.1 Trein, schip, vrachtwagen, bemand vliegtuig

Er is de laatste jaren veel aandacht voor de gevolgen van menselijk handelen op het milieu. Er zijn daarom al vele onderzoeken gedaan naar de belasting van het milieu door transport. Vele hiervan, zoals (Uherek, 2010), kijken echter naar de totale uitstoot van CO₂-equivalenten van alle voertuigen van een transport modus samen. Voor dit onderzoek is dit echter niet zinvol, wij hebben de CO₂ uitstoot per ton/km nodig om een goede vergelijking te kunnen maken. In Tabel 3 staat de CO₂ uitstoot van de diverse transportmodi weergegeven. In deze getallen is de milieubelasting van de productie en de infrastructuur al meegenomen.

Transportmodus	CO ₂ uitstoot in gram per ton*km (/100)
Trein	0,25 (Facanha & Horvath, 2006)
Schip	0,44 (Beuthe, Degrandart, Geerst, & Jourquin, 2002)
Vrachtwagen	0,5 (Facanha & Horvath, 2006)
Vliegtuig	8,8 (Facanha & Horvath, 2006)

Tabel 3: CO₂ uitstoot

2.3.2 OVV's

De international civil aviation organization (ICAO) heeft een methode ontwikkeld om de CO₂ uitstoot per passagier te bereken (ICAO, 2012). Voor het gebruik van deze methode hebben ze een lijst opgesteld met de CO₂ uitstoot van verschillende vliegtuigtypen per vlucht¹. Deze lijst kunnen we gebruiken om de CO₂ uitstoot (door verbranding van brandstof) per ton/km te bepalen voor een vliegtuig zonder passagiers. We zullen het OVV vergelijken met een bemand vliegtuig en vervolgens corrigeren voor het feit dat een OVV verhoudingsgewijs meer lading mee zal nemen dan een passagiersvliegtuig.

Om een schatting te maken van de uitstoot, moet een bestaand vliegtuig worden gevonden dat vergelijkbaar is qua motoren en maximaal startgewicht. Hierbij maken we gebruik van het feit dat passagiersvliegtuigen qua aerodynamische eigenschappen allemaal erg op elkaar lijken. Wanneer we dus een vliegtuig vinden met vergelijkbare motoren en maximaal startgewicht, kunnen we een betrouwbare schatting maken van de uitstoot. De totale uitstoot over een vlucht zal ongeveer voor een OVV ongeveer hetzelfde zijn als voor het vergelijkbare bemande vliegtuig. De uitstoot per ton/km zal echter wel verschillen, doordat een OVV meer lading zal vervoeren in verhouding tot het totale gewicht van het vliegtuig.

De uitstoot per ton/km is simpel te bepalen door de gevonden waarde te delen door de payload*afstand.

$$U_{\text{verbranding,OVV}} = \frac{Tu_{\text{vergelijkbaar}}}{pl * a}$$

$U_{\text{verbranding,OVV}}$: De totale uitstoot CO₂ per ton*km.

$Tu_{\text{vergelijkbaar}}$: De totale uitstoot gedurende de hele vlucht van een vergelijkbaar passagiersvliegtuig.

pl: Payload van het OVV.

a: Afstand van de vlucht.

¹ Zie Appendix B en C van de ICAO methode (ICAO, 2012)

Wanneer het niet mogelijk is om een vergelijking met een bestaand vliegtuig te maken, zal een andere methode moeten worden ontworpen om de uitstoot te schatten. Hiervoor is bijvoorbeeld de uitstoot, van bepaalde motor, van de verbranding van 1 kg brandstof nodig. Deze gegevens zijn echter nergens vrij beschikbaar. Vermoedelijk zijn de fabrikanten van de motoren wel in het bezit van deze gegevens.

De hierboven bepaalde uitstoot is de uitstoot door verbranding van brandstof. De totale uitstoot, inclusief het aanleggen van infrastructuur is hoger. Bij bemande vliegtuigen is bekend dat de totale CO₂ uitstoot 46% hoger ligt dan de uitstoot door verbranding (Facanha & Horvath, 2006). Wanneer het productieproces van OVV's vergelijkbaar is met dat van bemande vliegtuigen, en er niet veel extra infrastructuur nodig is, kan de totale CO₂ uitstoot van OVV's dus worden geschat door:

$$U_{tot} = U_{verbranding,OVV} * 1.46$$

U_{tot} : De totale uitstoot per ton/km

$U_{verbranding}$: De uitstoot per ton/km door verbranding van brandstof

Hierbij moet wel de kanttekening worden geplaatst dat het niet zeker is of de verhouding van uitstoot door infrastructuur en verbranding wel hetzelfde is voor OVV's als voor bemande vliegtuigen. Er is weliswaar minder infrastructuur nodig voor een OVV dan voor een bemand vliegtuig, doordat er bijvoorbeeld geen passagiersterminal nodig is op een landingslocatie. Toch kan het zo zijn dat de uitstoot door infrastructuur per ton*km voor OVV's verhoudingsgewijs hoger is, doordat de infrastructuur minder vaak gebruikt wordt, en de uitstoot voor de aanleg hiervan moet worden verdeeld over minder vliegtuigen.

2.4 Controle

2.4.1 Flexibiliteit

Flexibiliteit is de mogelijkheid voor spoedleveringen. Als indicator voor de flexibiliteit van de transportmodus gebruiken we de afstand van vertrek- en aankomstlocatie tot het terrein van de verzendende en ontvangende organisatie. In de praktijk zijn er meer factoren die leiden tot een hogere flexibiliteit. Ook een hogere transportfrequentie en een kortere transporttijd leiden tot een hogere flexibiliteit. Deze laatste twee factoren worden echter al apart meegenomen in het model. Een gebruiker van dit model moet er dus rekening mee houden dat flexibiliteit deels door de andere criteria wordt gedekt en het dus een lager gewicht moet krijgen dan wanneer de gehele flexibiliteit in één criterium zou worden bevat.

$$Flex = x_{vertrek} + x_{aankomst}$$

Flex: De flexibiliteit van de transportmodus

$x_{vertrek}$: Afstand van de verzendende organisatie tot vertreklocatie van het transportmiddel

$x_{aankomst}$: Afstand van de ontvangende organisatie tot aankomstlocatie van het transportmiddel

2.4.2 Controle over het tijdstip

2.4.2.1 Frequentie

De frequentie is het aantal leveringen dat per week op een bepaalde transportroute plaatsvindt. Wanneer de totale goederenstroom met een bepaalde transportmodus op een route bekend is, is de leveringsfrequentie eenvoudig als volgt te bepalen.

$$F = \frac{S}{C * u}$$

F: Leveringsfrequentie in aantal leveringen per week

S: (Potentiële) goederenstroom van de transportmodus in ton per week

C: Capaciteit van het transportvoertuig in ton

u: gemiddelde benutting van de capaciteit in procent

Hierbij is de potentiële goederenstroom het lastigste te bepalen. Voor de traditionele transportmodi is deze te bepalen aan de hand van historische gegevens, maar voor OVV's moet er een marktonderzoek plaatsvinden om de potentiële goederenstroom op een route te bepalen. Dit marktonderzoek valt buiten de kaders van dit onderzoek, maar zal in de toekomst wel uitgevoerd moeten worden voordat de waarde van het criterium frequentie kan worden bepaald.

OVV's kunnen waarschijnlijk een hogere leveringsfrequentie behalen, doordat ze een kleinere capaciteit hebben dan traditionele vliegtuigen. Traditionele vliegtuigen worden niet met een dergelijke kleine capaciteit ontworpen, omdat de kosten voor het gebruik dan te hoog worden. De kosten voor het gebruik van OVV's zullen veel minder sterk stijgen wanneer ze met een kleinere capaciteit ontworpen worden.

2.4.2.2 Minimaal benodigde lading

De minimaal benodigde lading is de lading die een transportmodus minimaal nodig heeft om rendabel te kunnen worden ingezet. Dit criteria hangt af van de capaciteit van een transportmodus en van de minimaal benodigde benutting van deze capaciteit.

$$L_{min} = C * u_{min}$$

L_{min} : Minimaal benodigde lading in ton

C : Capaciteit van het transportvoertuig in ton

u_{min} : Minimale benutting van de capaciteit voor een rendabel transport

Uit deze formule is direct duidelijk dat een transportmodus die een relatief lage capaciteit heeft ook een relatief lage minimaal benodigde lading zal hebben. OVV's zullen daarom op dit criterium, door hun relatief lage capaciteit, goed scoren ten opzichte van passagiersvliegtuigen.

2.5 Verlies en schade

De kans op verlies of schade van de verschillende transportmodi wordt over het algemeen niet als verklarende variabele gebruikt in de literatuur over transport modus keuze (Cullinane & Toy, 2000). Hierdoor zijn er ook weinig gegevens over deze variabele beschikbaar. Daarom wordt vermoed dat de kans op verlies en schade van de lading geen onderscheidende factor is bij het vergelijken van transportmodi op een directe route (d.w.z. dat de hele route met één transportvorm kan worden afgelegd).

Wanneer er tussen twee plaatsen geen directe route is met een van de transportvormen, kunnen de twee plaatsen wel met elkaar worden verbonden door gecombineerd transport. Als de vertreklocatie bijvoorbeeld geen vliegveld heeft, kan het zijn dat de vracht eerst per vrachtwagen naar een vliegveld wordt gebracht en vervolgens per vliegtuig verder gaat naar de aankomstlocatie. Op deze manier vindt er dus overslag plaats.

Wanneer we er vanuit gaan dat bij elke overslag een constante kans op schade is die gelijk is aan de kans op schade bij laden en lossen, kan de kans op verlies of schade gedurende het totale transport worden bepaald door:

$$P_{loss,totaal} = 1 - (1 - P_{loss})^{1+n}$$

$P_{loss,totaal}$: De kans op verlies of schade gedurende het hele transport

P_{loss} : De kans op verlies of schade bij één keer laden en lossen

n : aantal keer overslag gedurende transport

Deze formule is simpel te herleiden door gebruik te maken van het feit dat $(1 - P_{loss})$ de kans weergeeft dat er (per overslag) geen verlies of schade optreedt bij het laden of lossen.

Dit criterium hoeft dus alleen meegenomen te worden wanneer OVV's worden vergeleken met een combinatie van de andere transportmodi. De grootte van de kans op verlies of schade is onbekend, maar is in de praktijk in ieder geval kleiner dan 1% per transport (Danielis & Marcucci, Attribute cut-offs in freight service selection, 2007).

3. Een eindscore bepalen

Nu duidelijk is hoe de scores van de verschillende transportmodi op de criteria bepaald kunnen worden, is de volgende stap het vergelijken van deze scores. Omdat criteria niet uit te drukken zijn in dezelfde grootte (bijvoorbeeld geld), moet er een manier gevonden worden om ze toch te kunnen vergelijken. Binnen het vakgebied van multiple criteria decision analysis (MCDA) bestaan er verschillende methoden om een dergelijke vergelijking te maken. In dit deel zal gekeken worden welke eigenschappen deze methoden hebben en welke methode het beste geschikt voor dit onderzoek.

3.1 MCDA

Onder de noemer van MCDA zijn vier verschillende typen modellen ontwikkeld met elk een ander doel (Jacquet-Lagrèze & Siskos, 2001):

1. Het vergelijken van de opties aan de hand van één schaal (vaak value of utility).
2. Een rangorde aanbrenge in utility van de verschillende opties, zonder dat de utility expliciet wordt berekend.
3. De opties indelen/sorteren in vooraf gedefinieerde groepen.
4. Het identificeren van de belangrijkste onderscheidende eigenschappen van de alternatieven en het beschrijven van de opties aan de hand hiervan.

Alle 4 de typen modellen geven een beschrijving van de alternatieven aan de hand van de eigenschappen, zodat de alternatieven vergeleken kunnen worden aan de hand van deze eigenschappen. De andere drie type modellen doen nog meer, maar modellen van type 4 houden hier op.

Modellen van type 3 delen de alternatieven in in categorieën, bijvoorbeeld zoals in Tabel 6.

Modellen van type 2 delen de alternatieven ook in in categorieën, maar bij deze methoden zijn de categorieën ingedeeld op een ordinale schaal. Dit wil zeggen dat de alternatieven dus gerangschikt worden op utility. Het beste alternatief krijgt dus rang 1, het alternatief wat hierna het beste is rang 2, enzovoorts. In tabel 5 staat hier een voorbeeld van. Hierbij wordt de utility van de alternatieven niet expliciet berekend waardoor het niet duidelijk wordt hoe ver de alternatieven van elkaar af liggen. Het kan bijvoorbeeld zo zijn dat de beste twee alternatieven heel veel verschillen, maar het kan ook zijn dat ze erg weinig verschillen.

Modellen van type 1 geven deze verschillen wel weer, doordat ze expliciet de utility van de opties berekenen. Deze modellen geven elk alternatief een score, waarbij de hoogste score het beste alternatief is, en de laagste score het slechtste. Hier wordt dus ook een rangorde aangebracht, maar nu is de afstand tussen de alternatieven wel duidelijk. In Tabel 4 is een voorbeeld van de output van modellen van type 1 weergegeven.

Type 1	
Optie	Score
A	95
B	70
C	40
D	30

Tabel 4: Type 1

Type 2	
Optie	Ranking
A	1
B	2
C	3
D	4

Tabel 5: Type 2

Type 3	
Optie	Categorie
A	Rendabel
B	Rendabel
C	Rendabel
D	Niet rendabel

Tabel 6: Type 3

In dit onderzoek zijn we geïnteresseerd in een vergelijking maken tussen de verschillende transportmodi. Het geeft weinig inzicht om enkel de beste modus te kiezen, omdat we vooral willen weten hoe een OVV zich verhoudt tot de andere transportmodi. Daarom zullen we gebruik maken van een MCDA methode die de verschillende transportmodi vergelijkt aan de hand van één criterium. Dit geeft meer inzicht dan het enkel aanbrengen van een rangorde, of het indelen in groepen.

We kunnen de MCDA methoden dus afbakenen tot methoden van de eerste categorie. Binnen deze categorie zijn echter nog steeds verschillende opties. In de rest van dit deel zullen we eerst een lijst opstellen van de wenselijke eigenschappen van de methoden. Vervolgens zullen we de beschikbare methoden en de daarbij horende voor- en nadelen beschrijven en tot slot bepalen welke methode het beste is voor gebruik voor de vergelijking van OVV's met andere methoden van transport.

3.1.1 AHP

De methode van AHP (analytical hierarchy process) is ontworpen door Saaty (1980). AHP maakt gebruik van paarsgewijze vergelijkingen tussen twee alternatieven op één enkel criterium. Bij elk van deze vergelijkingen moet worden aangegeven aan welk van de twee alternatieven de beslisser de voorkeur geeft, en hoe sterk deze voorkeur is. Deze voorkeur, uitgedrukt in woorden, wordt daarna vertaald naar cijfers volgens de in Tabel 7 weergegeven schaal. De uitleg van de definities is gegeven voor een vergelijking van twee criteria, maar is ook van toepassing op een vergelijking van twee alternatieven op één criterium. Door de scores van al deze paarsgewijze vergelijkingen in een matrix te zetten, ze per alternatief op te tellen en te normaliseren zodat er een score tussen 0 en 1 uit komt, kan de een eindscore berekend worden per criteria.

Vervolgens worden de gewichten van de criteria bepaald door eenzelfde vergelijking te maken tussen de criteria. Tot slot wordt het gewogen gemiddelde van de scores van de alternatieven op alle criteria berekend. Dit geeft een eindscore.

Intensity of weight	Definition	Explanation
1	Equal importance	Two criteria contribute equally to objectives
3	Weak/moderate importance of one over another	Experience and judgment slightly favored one criteria over another
5	Essential or strong importance	Experience and judgment strongly favor one criteria over another
7	Very strong or demonstrated importance	A criteria is favored very strongly over another; its dominance demonstrated in practice
9	Absolute importance	The evidence favoring one criteria over another is of the highest possible order of affirmation
2,4,6,8	Intermediate values between the two adjacent scale values	Used to represent compromise between the priorities listed above
Reciprocals of above non-zero number		If criteria <i>i</i> has one of the above non-zero numbers assigned to it when compared to criteria <i>j</i> , then <i>j</i> has the reciprocal value when compared with criteria <i>i</i>

Tabel 7: Schaal voor AHP vergelijkingen (Saaty, A scaling method for priorities in hierarchical structures, 1978)

In AHP is een redundantie ingebouwd, zodat het mogelijk is om de consistentie van de beslisser te bepalen. Wanneer alternatief A beter is dan B, en B beter dan C, kan worden afgeleid dat A ook beter moet zijn dan C. Doordat de vergelijking tussen A en C ook aan de beslisser wordt voorgelegd, kan de consistentie van de beslisser worden bepaald.

Het nadeel van AHP is dat vooraf duidelijk moet zijn wat de alternatieven zijn. Het is niet mogelijk om een AHP analyse te maken en later nog een nieuw alternatief toe te voegen. Het toevoegen van een nieuw alternatief kan er namelijk voor zorgen dat de rangorde van de bestaande alternatieven verandert, zonder dat de beslisser de scores van de bestaande alternatieven ten opzichte van elkaar verandert. Dit verschijnsel heet rank reversal en wordt uitgebreid bestudeerd in de literatuur (Goodwin & Wright, 2009).

Sterke punten:

- Paarsgewijze vergelijkingen zijn relatief eenvoudig voor de beslisser.
- Mogelijkheid tot een consistentiecheck.

Zwakke punten:

- Er kan rank reversal optreden wanneer er nieuwe alternatieven worden geïntroduceerd.
- Scores van de criteria moeten deterministisch zijn, dit betekent dat de scores van de criteria vooraf bepaald kunnen worden en onzekerheid of kans geen rol speelt.

3.1.2 TOPSIS

TOPSIS (Technique for order by similarity to ideal solution) is ontworpen door Hwang & Youn (1981) en maakt gebruik van het feit dat het beste alternatief zo dicht mogelijk bij het ideale alternatief ligt en zo ver mogelijk weg bij het minst ideale alternatief. Het ideale alternatief heeft op elk criterium de maximale score van alle bekende alternatieven. Het minst ideale alternatief heeft overal de slechtst mogelijke score. Voor elk alternatief wordt vervolgens de (euclidische) afstand tot het ideale en minst ideale alternatief bepaald. Doordat deze afstand wiskundig wordt bepaald, is er dus geen beslisser nodig. De optie die het dichtst bij het ideale en het verst van het minst ideale alternatief ligt, is de beste.

TOPSIS gaat er vanuit dat de value functie van de criteria altijd lineair verloopt. Dat wil zeggen dat, wanneer een alternatief op een criterium een score kan krijgen van bijvoorbeeld 0 tot 100, een stap van 10 naar 20 evenveel value oplevert als een stap van 90 naar 100. Ook gaat deze methode er vanuit dat de gewichten van de verschillende criteria gelijk zijn.

Sterke punten:

- Analytische methode die geen subjectieve input nodig heeft van een beslisser

Zwakke punten:

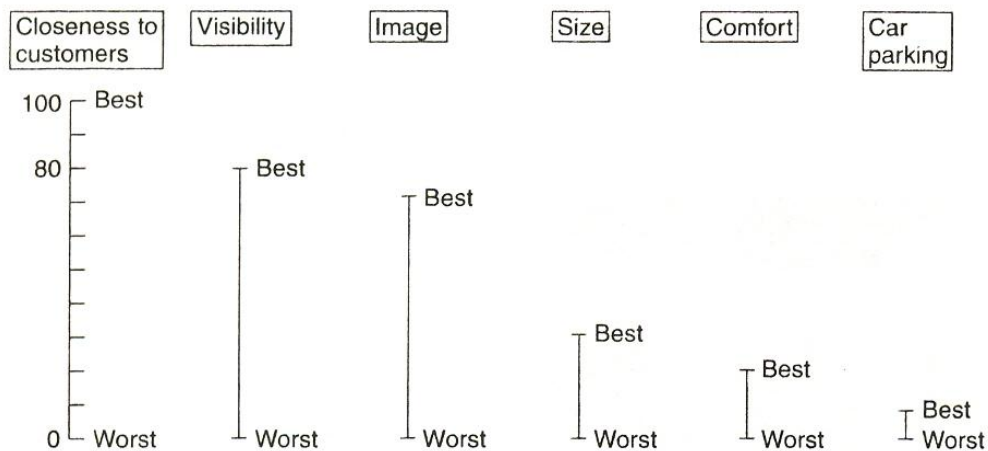
- Value functie moet lineair zijn.
- Gewichten van de verschillende criteria moeten gelijk zijn.
- Scores van de criteria moeten deterministisch zijn.

3.1.3 SMART

SMART (simple multiple attribute rating technique) is ontworpen door Edwards (1971). SMART wordt veel gebruikt omdat het een relatief simpele en overzichtelijke methode is. De scores van de alternatieven worden eerst per criterium uitgedrukt in een schaal van 0 tot 100, waarbij 0 de waarde is van het slechtste alternatief en 100 de waarde van het beste alternatief. Om de score van de opties die qua prestaties op een criterium hier tussenin liggen te bepalen, wordt gebruik gemaakt van een value functie. Deze hoeft in tegenstelling tot bij de TOPSIS methode niet per sé lineair te zijn. De beslisser heeft de vrijheid om een dergelijke functie te bepalen.

Om een value functie van een criterium te bepalen, moet de beslisser bedenken welke score een optie zou moeten hebben om een value van 50 te hebben. Dit wil zeggen dat een sprong van de score van de slechtste optie naar deze score evenveel value oplevert als een sprong van deze score naar de score van de beste optie. Vervolgens wordt hetzelfde herhaald voor een value van 25 en 75 (en eventueel nog vaker als dat nodig is) en kan een functie worden bepaald die door al deze punten loopt. Dit is de value functie.

Wanneer elk alternatief op deze manier voor elk criterium een score tussen de 0 en 100 heeft gekregen, worden de gewichten van de criteria bepaald door middel van swing weights. Dit wordt gedaan door het hypothetische geval te bekijken waarin een optie de waarde 0 heeft op elk criterium. De beslisser wordt vervolgens gevraagd op welk criterium hij het liefst de score zou verbeteren van 0 naar 100. Dit criterium krijgt een gewicht van 100. Vervolgens wordt voor elk ander criterium gevraagd hoe belangrijk de beslisser een 'swing' van slechtst naar best mogelijke score vindt. In Figuur 7 staat een voorbeeld weergegeven waar de beslisser de criteria voor een vestigingslocatie af moest wegen.



Figuur 7: Swing weights. In dit voorbeeld is een 'swing' van slechtst naar best mogelijke score op 'visibility' 80% zo belangrijk als een 'swing' van slechtst naar best mogelijke 'closeness to customers' (Goodwin & Wright, 2009).

Tot slot wordt het gewogen gemiddelde bepaald van alle alternatieven. De optie met de hoogste score, is het beste alternatief.

Sterke punten:

- Eenvoudig en overzichtelijk.
- Vrijheid in het kiezen van de value functie per criterium.

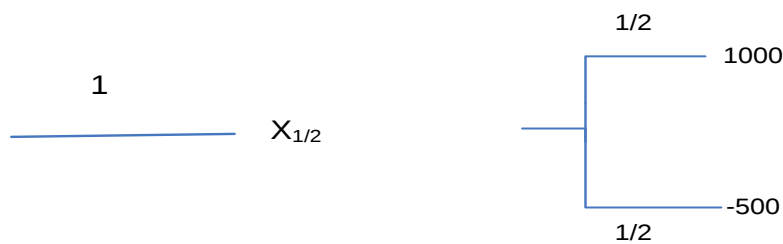
Zwakke punten:

- Scores van de criteria moeten deterministisch zijn.
- Relatief lastige input van de beslisser nodig.

3.1.4 MAUT

MAUT (multiple attribute utility theory) is de laatste belangrijke methode die we gaan bekijken. MAUT is ontworpen door Keeney & Raffia (1976). MAUT onderscheidt zich vooral van de andere methoden door het feit dat de scores van de criteria niet deterministisch hoeven te zijn. Om deze methode goed te kunnen gebruiken, moet de beslisser enige kennis van kansrekening en statistiek bezitten.

Voor elk criterium wordt een utility functie opgesteld. Dit gebeurt aan de hand van het certainty equivalent van loterijen. Bekijk bijvoorbeeld Figuur 8. De beslisser heeft hier twee opties. Optie één is dat hij $x_{1/2}$ krijgt met kans 1, optie twee is dat hij met kans $\frac{1}{2}$ 1000 krijgt en met kans $\frac{1}{2}$ -500. De beslisser wordt vervolgens gevraagd te bepalen wat de waarde van $x_{1/2}$ is waarvoor hij geen voorkeur heeft voor beide opties. Beide opties zijn voor hem voor deze waarde van $x_{1/2}$ dus gelijkwaardig.



Figuur 8: Certainty equivalent (Goodwin & Wright, 2009)

De best mogelijke score krijgt per definitie een utility van 1, de slechtst mogelijke score een utility van 0. Door meerdere van dit soort loterijen te bekijken, kan uiteindelijk een utility functie per criterium worden opgesteld en kan de score van elk alternatief dus worden bepaald. Op deze manier wordt de risico aversie (de houding tegenover risico) van de gebruiker dus meegenomen in de utility functie.

Vervolgens moeten de gewichten van de criteria nog worden bepaald. De manier waarop dit moet worden niet voorgeschreven door MAUT en kan dus met bijvoorbeeld swing weights of AHP worden gedaan.

Tot slot wordt ook hier per optie gekeken naar het gewogen gemiddelde van de scores op alle criteria. Wederom is het beste alternatief de optie met het hoogste gemiddelde.

Sterkte punten:

- Scores van de criteria mogen stochastisch zijn.
- Kan omgaan met risico zoekend of risico mijndend gedrag.

Zwakke punten:

- Heeft de lastigste gebruikersimput nodig, omdat de gebruiker voorkennis van kansrekening en statistiek nodig heeft.

3.2 Keuze voor methode

Bij de keuze voor de MCDA methode is het van belang om in ieder geval te kijken naar de volgende aspecten (Guitouni & Martel, 1998):

- Wie is de beslisser?
- Wat wil de beslisser bereiken met de MCDA methode?
- Voldoet de praktijk aan de aannames van de methode?

Het platform onbemande vrachtvliegtuigen is de uiteindelijke beslisser over het maken van OVV's. Zij zal dan ook de gebruiker zijn van dit model. Het doel van de OVV's is het efficiënter vervoeren van vracht dan met traditionele methoden van transport (op bepaalde routes). Met behulp van de MCDA methode kunnen de scores van de criteria die in dit onderzoek zijn bepaald geaggregeerd worden tot een eindoordeel.

Omdat er nog geen ontwerp van het OVV is en de ontwerpparameters (zoals kruissnelheid) nog te kiezen zijn, is het wenselijk dat de MCDA methode de mogelijkheid heeft om verschillende mogelijke ontwerpen met elkaar te vergelijken.

Bij AHP bestaat er het risico op rank reversal wanneer er nieuwe alternatieven worden toegevoegd in de analyse. Wanneer in de loop van het ontwerpproces belangrijke eigenschappen zoals kruissnelheid, of maximale betalende lading veranderen, is het dus niet meer mogelijk om te kijken wat voor effect dit heeft op de totale baten van het OVV. SMART, TOPSIS en MAUT hebben deze beperking niet.

Één van de voorwaarden van TOPSIS is dat de value functie lineair moet zijn. In de praktijk is dit niet noodzakelijk het geval. Het kan zo zijn dat een verbetering van de transporttijd van 2 naar 1 dag meer value oplevert dan een verbetering van 14 naar 13 dagen. Het is niet onderzocht of dit echt het geval is, maar het is onverstandig om dit bij voorbaat uit te sluiten. Hierdoor is ook deze methode niet geschikt.

Wanneer we SMART en MAUT vergelijken zien we dat SMART relatief eenvoudiger te gebruiken is, maar dat MAUT als enige methode om kan gaan met stochastische data. Risico speelt geen grote rol in de beslissing, en hoewel er schattingen gemaakt moeten worden bij het bepalen van de scores op de criteria, speelt onzekerheid geen grote rol. Daarom kan het beste SMART gebruikt worden om een totaalscore te bepalen. Een gedetailleerde beschrijving van SMART is te vinden in Goodwin & Wright (2009).

4. Voorbeeld van de methode

Als illustratie van de werking van deze methode zullen we een fictief voorbeeld geven. De getallen die we hier gebruiken zijn slechts een zeer grove schatting, omdat het doel van dit voorbeeld alleen is om de methodiek te illustreren.

Wanneer deze methode in de praktijk wordt gebruikt, moet altijd ook naar de kosten worden gekeken. Een OVV zal bijvoorbeeld beter scoren op de baten wanneer de transporttijd lager is, maar dit zal hogere brandstofkosten als gevolg hebben.

In dit voorbeeld bekijken we een OVV dat op een special vliegveld naast het bedrijventerrein kan landen. We bekijken de route van Amsterdam naar Marseille. De afstand van deze route is 1200 km en we gaan er vanuit dat deze hetzelfde is voor alle transportmodi.

We bekijken een fictief bedrijventerrein waar een landingsbaan (en de overige benodigde faciliteiten) voor OVV's is aangelegd. OVV's en vrachtwagens leveren dus rechtstreeks, schepen en bemande vliegtuigen leveren op een totale afstand van 20 km van het terrein van de organisatie, treinen op 10 km afstand (de transporttijd en betrouwbaarheid van deze laatste kilometers verwaarlozen we voor de eenvoud van het voorbeeld). De kans op verlies of schade is 0,25% per keer overslag.

De milieubelasting van een OVV is hier hetzelfde als dat van een bemand vliegtuig. Een schatting voor de frequentie is dat een OVV door de lagere capaciteit twee keer zo vaak kan vliegen als een bemand vliegtuig.

Als schatting voor de minimaal benodigde lading gebruiken we 75% van de capaciteit van een transportmiddel. We gaan er hierbij vanuit dat een schip een capaciteit heeft van 1000 ton, een trein 100 ton, een bemand vliegtuig 20 ton, een vrachtwagen 10 ton en een OVV 5 ton.

Transporttijd

De transporttijd is berekend aan de hand van de gegevens uit hoofdstuk 2. We bekijken een vliegtuig met een kruissnelheid van 800 km/uur en een OVV met een kruissnelheid van 400 km/uur. De vlucht duurt dan respectievelijk 1,5 en 3 uur. Het bemande vliegtuig is 25 minuten bezig met taxiën en heeft een turnaround tijd van 45 minuten. De OVV is 17 minuten kwijt aan het taxiën en heeft een turnaround tijd van 20 minuten. Dit geeft een totale transporttijd van 2,6 uur voor bemande vliegtuigen en 3,6 uur voor onbemande vliegtuigen.

Betrouwbaarheid

De variatiecoëfficiënten van de verschillende transportmodi zijn een schatting. De variatiecoëfficiënt van een bemand vliegtuig schatten we op 1,5. Deze is opgebouwd zoals weergegeven in Tabel 8.

Air carrier	Onderhoud	$0,20 \cdot 1,5 = 0,3$
	Laden/lossen	$0,10 \cdot 1,5 = 0,15$
Extreme weather		$0,05 \cdot 1,5 = 0,075$
NAS	Wind	$0,15 \cdot 1,5 = 0,225$
	ATC	$0,14 \cdot 1,5 = 0,21$
Late-arriving aircraft		$0,35 \cdot 1,5 = 0,525$
Security		$0,01 \cdot 1,5 = 0,015$

Tabel 8: Opbouw variantiecoëfficiënt bemande vliegtuigen

De in hoofdstuk 2 genoemde formule heeft varianties als input nodig. We kunnen deze echter ook aanpassen voor gebruik met variatiecoëfficiënten door het geheel te vermenigvuldigen met de ratio van de transporttijden van OVV's en bemande vliegtuigen (in dit geval 2,6/3,6). Als we er verder vanuit gaan dat de vertraging door onderhoud, laden/lossen en late-arriving aircraft even vaak voorkomt als bij bemande vliegtuigen, de vertraging door security voor OVV's niet relevant is, de gevolgen door ATC de helft is van bij bemande vliegtuigen, doordat de OVV's op een vliegveld speciaal voor OVV's landen en het hier minder druk is. De vertraging door wind wordt berekend zoals in hoofdstuk 2 beschreven, dan is de variantiecoëfficiënt van de OVV's 1,48.

In Tabel 9 staan alle scores weergegeven.

	Schip	Vrachtwagen	Bemand vliegtuig	Trein	OVV
Frequentie (per week)	1	20	7	3	14
Minimaal benodigde lading (ton)	750	7,5	15	75	3,75
Flexibiliteit (km)	20	0	20	10	0
Milieubelasting (gram per ton*km / 100)	0,44	0,5	8,8	0,25	8,8
Kans op verlies of schade (%)	0,5001	0,25	0,5001	0,5001	0,25
Betrouwbaarheid (Variantiecoëfficiënt)	0,5	1	1,5	0,75	1,48
Transporttijd	40	25	2,6	13	3,6

Tabel 9: fictieve scores van de criteria

Vervolgens kunnen de gewichten van de criteria worden bepaald met swing weights. Stel de beslisser vindt een swing van slechts naar best mogelijke score op transporttijd het belangrijkste. Verder vindt hij eenzelfde swing van betrouwbaarheid 50% zo belangrijk, flexibiliteit, minimaal benodigde lading en frequentie elk 15% zo belangrijk, kans op verlies of schade 10% en milieubelasting 5% zo belangrijk.

Voor de eenvoud van dit voorbeeld gaan we er ook van uit dat alle value functies lineair verlopen. De eindscores zijn dan te vinden in Tabel 10.

	Gewicht	Schip	Vrachtwagen	Bemand vliegtuig	Trein	OVV
Frequentie	0,07	0	100	35	15	70
Minimaal benodigde lading	0,07	0	99	98	87	100
Flexibiliteit	0,07	0	100	0	50	100
Milieubelasting	0,02	97	97	0	100	0
Kans op verlies of schade	0,05	0	100	0	0	100
Betrouwbaarheid	0,24	100	50	0	75	2
Transporttijd	0,48	0	34	100	66	98
Totaal	1	13,9	56,2	57,3	63,1	71,4

Tabel 10: Fictieve eindscores

Doordat er fictieve gegevens en lineaire value functies zijn gebruikt in dit voorbeeld, zegt deze eindscore weinig. Wel geeft dit voorbeeld aan hoe er met de, in dit onderzoek ontworpen, methode gewerkt kan worden.

5. Conclusie

Het in dit onderzoek gepresenteerde model geeft een zo volledig mogelijk beeld van de baten van transportmodi. Wanneer er twijfel mogelijk was over de baten, is ervoor gekozen om ze toch mee te nemen in het model, om op deze manier zo volledig mogelijk te zijn. Een gebruiker heeft namelijk zelf nog wel de mogelijkheid om criteria niet mee te nemen door ze een gewicht van 0 te geven, maar nieuwe criteria bedenken en uitwerken zou veel meer tijd kosten.

Aan de hand van de in dit onderzoek gepresenteerde methode, kunnen de baten van nog te ontwerpen OVV's worden vergeleken met traditionele methoden van transport. Als eerste moeten de scores van de verschillende transportmodi op de criteria die in het eerste hoofdstuk beschreven zijn bepaald worden. Om dit te kunnen doen moeten de onbekenden, die in het tweede hoofdstuk beschreven zijn, geschat of bepaald worden. In het derde hoofdstuk staat beschreven hoe de verschillende scores geaggregeerd kunnen worden tot één eindoordeel. De eindscores moeten altijd vergeleken worden met de kosten, die al bepaald zijn in een eerder onderzoek (Prent & Lugtig, 2012).

Ook kan de eindscore van OVV's worden uitgedrukt als functie van één of meerdere ontwerpparameters (zoals cruisesnelheid). Hierdoor is het mogelijk met behulp van deze methode de optimale waarden van de ontwerpparameters te bepalen door de baten te vergelijken met de kosten. Ook is het nu mogelijk om te bepalen op welke routes het aantrekkelijk is om een OVV in te zetten. Voordat dit kan gebeuren moet nog wel onderzoek worden gedaan naar de grootte van de (potentiele) goederenstromen op deze routes.

Het is aan te raden in een vervolgonderzoek nog te kijken naar de investeringskosten voor het bereikbaar maken van een locatie met OVV's. Deze wordt namelijk niet meegenomen in het kostenmodel van Prent en Lugtig (2012), omdat zij alleen hebben gekeken naar de 'direct operating costs'. Wanneer het mogelijk is om voor een kleine investering een route van begin tot eind te bedienen met OVV's levert dit, zoals uit het model blijkt, een hogere flexibiliteit en een lagere kans op verlies of schade op (omdat er minder overslag nodig is). Dit kan reden zijn voor een organisatie om OVV's te verkiezen boven andere methoden van transport.

Bronvermelding

- Airbus. (2012). *Airbus*. Opgeroepen op September 6, 2012, van A320 family: http://www.airbus.com/fileadmin/media_gallery/files/brochures_publications/aircraft_families/A320_Family_market_leader-leaflet.pdf
- Allen, B., Mahmoud, M., & McNeil, D. (1985). The importance of time in transit and reliability of transit time for shippers, receivers, and carriers. *Transportation Research* , 19(5), 447-456.
- Anderson, J. (2008). *Introduction to Flight*. McGraw-Hill.
- ATR. (2012). *ATR*. Opgeroepen op September 6, 2012, van ATR Aircraft: <http://www.atraircraft.com/products/atr-72-500.html>
- Beuthe, M., Degrandart, F., Geerst, J.-F., & Jourquin, B. (2002). External costs of the belgian interurban freight traffic: a network analysis of their internalisation. *Transportation Research part D* 7 , 285-301.
- Boeing. (2012). *Boeing*. Opgeroepen op September 6, 2012, van 777 payload-range specifications: http://www.boeing.com/commercial/startup/pdf/777_payload.pdf
- Boeing. (2012). *Boeing*. Opgeroepen op September 6, 2012, van 777-300 Technical characteristics: http://www.boeing.com/commercial/777family/pf/pf_300product.html
- Bureau of Transportation Statistics. (2007). *Sitting on the Runway: Current Aircraft Taxi Times Now Exceed Pre-9/11 Experience*. Opgeroepen op July 11, 2012, van Bureau of Transportation Statistics: http://www.bts.gov/publications/special_reports_and_issue_briefs/special_report/2008_008/html/entire.html
- Bureau of Transportation Statistics. (2012). *Understanding the reporting of causes of flight delays and cancellations*. Opgeroepen op August 23, 2012, van BTS: www.btw.gov/help/aviation/html/understanding.html
- Cullinane, K., & Toy, N. (2000). Identifying influential attributes in freight route/mode choice decisions: A content analysis. *Transportation research* , 41-53.
- Curran, R. (2003). Influence of manufacturing tolerance on aircraft direct operating cost (DOC). *Journal of Materials Processing Technology* , 208-213.
- Danielis, R., & Marcucci, E. (2007). Attribute cut-offs in freight service selection. *Transportation research part E* 43 , 506-515.
- Danielis, R., Marcucci, E., & Rotaris, L. (2005). Logistics managers' stated preferences for freight service attributes. *Transportation Research , Part E* 41, 201-215.
- Edwards, W. (1971). Social Utilities. *Engineering Economist , Summer symposium series* (6).
- Eye for transport. (2011, April 15). *Study measures truck turnaround times at Port of LA/LB*. Opgeroepen op Juli 12, 2012, van Eye for transport: <http://www.eft.com/freight-transport/study-measures-truck-turnaround-times-port-la-lb>
- Facanha, C., & Horvath, A. (2006). Environmental assessment of freight transportation in the U.S. *The international journal of life cycle assessment* , 11 (4), pp. 229-239.
- Fowkes, A., & Frimin, P. T. (2004). How highly does the freight transport industry value journey time reliability - and for what reasons? *Internations Journal of Logistics* , 7 (1), 33-42.
- Goodwin, P., & Wright, G. (2009). *Decision analysis for management Judgement* (4th ed.). UK: John Wiley & Sons Ltd.
- Guitouni, A., & Martel, J. (1998). Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. *European journal of operational research* , 109, 501-521.
- Halse, A., Samstad, H., & Killa, M. &. (2010). *Valuation of transport time and reliability in freight transport*. Opgeroepen op 5 25, 2012, van TOI: <https://www.toi.no/getfile.php/Publikasjoner/T%D8I%20rapporter/2010/1083-2010/sum-1083-2010.pdf>
- Heerkens, H. (2011). *De ontwikkeling van onbemande vrachtvliegtuigen: specificaties en werkplan*. Enschede: Hans Heerkens.
- Hicks, M. (2004). *Problem solving and decision making*. Cengage Learning EMEA.
- Hwang, C., & Youn, K. (1981). *Multiple attribute decision making - methods and applications: a state of the art survey*. New York: Springer.
- ICAO. (2012, June). *ICAO Carbon Emissions Calculator version 5*. Opgeroepen op August 3, 2012, van http://www.icao.int/environmental-protection/CarbonOffset/Documents/Methodology%20ICAO%20Carbon%20Calculator_v5-2012.Revised.pdf

- Jacquet-Lagrèze, E., & Siskos, Y. (2001). Preference disaggregation: 20 years of MCDA experience. *European journal of operational research* (130), 233-245.
- Jeffs, V., & Hills, P. (1990). Determinants of modal choice in freight transport. *Transportation*, pp. 29-47.
- Keeney, R., & Raffia, H. (1976). *Decisions with multiple objectives: Preferences and value tradeoffs*. New York: John Wiley & Sons.
- Lagoudis, I., Lalwani, C., Naim, M., & King, J. (2002). Defining a conceptual model for high-speed vessels. *International journal of transport management* 1, 69-78.
- Lingaitiene, O. (2008). A Mathematical model of selecting transport facilities for multimodal freight transportation. *Transport*, 23:1, pp. 10-15.
- Lufthansa. (2012). *planet trends: figures & trends*. Opgeroepen op August 29, 2012, van Lufthansa Cargo: <http://lufthansa-cargo.com/index.php?id=1660>
- Marelli, S., Mattocks, G., & Merry, R. (1998). The role of computer simulation in reducing airplane turn time. *BoeingAero Magazine* 1.
- Medda, F., & Trujillo, L. (2010). Short-sea shipping: an analysis of its determinants. *Maritime policy & management: the flagship journal of international shipping and port research*, 37:3, 285-303.
- Mueller, E., & Chatterji, G. (2002). *Analysis of aircraft arrival and departure delay characteristics*. Moffett Field: NASA Ames research Center.
- PBLIS. (2012, May). Opgeroepen op Juli 12, 2012, van Sydney Ports: http://www.sydneyports.com.au/port_development/?a=17720
- Port of Rotterdam. (2011). *Jaarverslag 2011*. Rotterdam.
- Prent, S., & Lugtig, J. (2012, Mei 11). Onbemande vrachtvliegtuigen: Kosten-analyse. Enschede.
- ProRail. (2012). *FAQ Overzicht*. Opgeroepen op Juli 11, 2012, van ProRail: <http://www.prorail.nl/faq/Pages/FAQOverzicht.aspx>
- Rodrigue, J. (2011). *Fuel consumption by containership size and speed*. Opgeroepen op Juli 12, 2012, van Hofstra University: http://people.hofstra.edu/geotrans/eng/ch8en/conc8en/fuel_consumption_containerships.html
- Saaty, T. (1978). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 57-68.
- Saaty, T. (1980). *The analytical hierarchy process*. New York: McGraw-Hill.
- Schürmann, C., & Talaat, A. (2000). *Towards a European Peripherality Index*. Opgeroepen op Juli 12, 2012, van http://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/studies/pdf/periph_3.pdf
- Shinghal, N., & Fowkes, T. (2002). Freight mode choice and adaptive stated preferences. *Transportations Research, Part E* 38, 367-378.
- Spielman, M., & Scholz, R. (2005). Life cycle inventories of transport services - background data for freight transport. *International journal of life cycle assessment*, 10 (1), pp. 85-94.
- Thomas, P. (1990). *Competitiveness through total cycle time*. New York: McGraw-Hill.
- Transporters' Friends. (2012). *Drivers rest periods and breaks*. Opgeroepen op Juli 12, 2012, van Transporters' Friends: <http://www.transportsfriend.org/hours/rest.html>
- Uherek, E. e. (2010). Transport impacts on atmosphere and climate: Land transport. *Atmospheric Environment*, 44, 4772-4816.
- Witlox, F., & Vandaele, E. (2005, April). Determining the monetary value of quality attributes in freight transportation using a stated preference approach. *Transportation planning and Technology*, pp. 77-92.

Bijlage 1: Herleiding van de variantie door wind

De formule voor de variantie van OVV's als gevolg van de wind luidt:

$$Var_{ovv,wind} = Var_{bemand,wind} * \left(\frac{V_{bemand}}{V_{ovv}}\right)^2$$

Deze kan als volgt worden herleidt:

$$Var_{bemand,wind} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (EVt - Vt_i)^2$$

EVt: De verwachte vluchttijd van een bemand vliegtuig.

Vt_i: De gerealiseerde vluchttijd van waarneming i (van een bemand vliegtuig)

n: Aantal waarnemingen

Wanneer V_{ovv} de snelheid is van een OVV, kan de vluchttijd van een OVV als volgt worden uitgedrukt:

$$EVt_{ovv} = \frac{V_{bemand}}{V_{ovv}} * EVt$$

Hetzelfde geldt voor de gerealiseerde vluchttijd van de i-de waarneming, maar dan moet wel gecorrigeerd worden voor de wind. Wanneer alle vertraging door tegenwind veroorzaakt wordt, volgt hieruit de volgende formule:

$$EVt_{i,ovv} = \frac{V_{bemand} - V_{wind}}{V_{ovv} - V_{wind}} * EVt_i$$

EVt_{i,ovv} is hier de (fictieve) vluchttijd wanneer deze vlucht met een OVV zou worden uitgevoerd en V_{wind} is de gemiddelde windsnelheid gedurende de vlucht.

We kunnen nu $\frac{V_{bemand}-V_{wind}}{V_{ovv}-V_{wind}}$ benaderen door $\frac{V_{bemand}}{V_{ovv}}$. Naarmate de windsnelheid groter wordt, wordt deze benadering minder nauwkeurig, maar het geeft bij een windsnelheid van 50 km/uur (windkracht 6 á 7) nog steeds redelijk accurate schatting van $\frac{V_{bemand}-V_{wind}}{V_{ovv}-V_{wind}}$. Voor V_{ovv}=400 km/uur en V_{bemand}=800 km/uur is het verschil 400/800=0,5 en 350/750=0,47. Dit is een afwijking van 6%. Aangezien alle andere factoren voor de variantie in dit model geschat worden, is dit een acceptabele afwijking.

Dus

$$\begin{aligned} Var_{bemand,wind} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (EVt_{ovv} - Vt_{i,ovv})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{V_{bemand}}{V_{ovv}} * EVt - \frac{V_{bemand}}{V_{ovv}} * EVt_i \right)^2 \\ &= Var_{bemand,wind} * \left(\frac{V_{bemand}}{V_{ovv}} \right)^2 \end{aligned}$$

Bijlage 2: Berekeningen bij het voorbeeld van de methode

De transporttijd is als volgt tot stand gekomen:

Vrachtwagen

Snelheid 80 km/uur.

Directe transporttijd zonder pauzes: $1200/80=15$ uur. Er mag 11,5 uur per dag gereden worden, dus de directe transporttijd met pauzes is $24+3,5=27,5$.

Turn-around tijd: 30 minuten (hoofdstuk 2).

Totale transporttijd: 28 uur

Frequentie: 20 keer per week (schatting)

Minimaal benodigde lading: $0,75*10=7,5$ ton

Flexibiliteit: Directe verbinding, dus 0 km.

Milieubelasting: 0,25 gram per ton*km/100 (zie hoofdstuk 2)

Kans op verlies of schade: Geen overslag, dus 0,25%

Betrouwbaarheid: 1 (schatting van de variantiecoëfficiënt)

Schip

Snelheid 33 km/uur, Turnaround tijd 4 uur

Totale transporttijd: $1200/33+4=40$ uur

Frequentie: 1 per week (schatting)

Minimaal benodigde lading: $0,75*1000=750$ ton

Flexibiliteit: 20 km

Milieubelasting: 0,44 gram per ton*km/100 (zie hoofdstuk 2)

Kans op verlies of schade: 1 keer overslag, dus $1-0,9975^2=0,5001$

Betrouwbaarheid: 0,5 (schatting van de variantiecoëfficiënt)

Bemand vliegtuig

Kruissnelheid 800 km/uur, turnaround tijd 45 minuten, taxi-tijd 25 minuten.

Directe transporttijd: $1200/800 = 1,5$ uur.

Totale transporttijd: $1,5 + 45/60 + 25/60 = 2,7$ uur

Frequentie: 1 keer per dag, dus 7 keer per week

Minimaal benodigde lading: $0,75*20=15$ ton

Flexibiliteit: 20 km

Milieubelasting: 8,8 gram per ton*km/100 (Zie hoofdstuk 2)

Kans op verlies of schade: 1 keer overslag, dus $1-0,9975^2=0,5001$

Betrouwbaarheid: 1,5 (schatting van de variantiecoëfficiënt)

Trein

Snelheid 90 km/uur, Turnaround tijd 2 uur (schatting)

Totale transporttijd: $1200/90+2=15,3$ uur

Frequentie: 3 per week (schatting)

Minimaal benodigde lading: $0,75*100=75$ ton

Flexibiliteit: 10 km

Milieubelasting: 0,25 gram per ton*km/100 (Zie hoofdstuk 2)

Kans op verlies of schade: 1 keer overslag, dus $1-0,9975^2=0,5001$

Betrouwbaarheid: 0,75 (schatting van de variantiecoëfficiënt)

OVV

Snelheid 400 km/uur, turnaround tijd 20 minuten, taxi-tijd 17 minuten.

Totale transporttijd: $1200/400+20/60+17/60=3,6$ uur

Frequentie: 14 per week

Minimaal benodigde lading: $0,75*5=3,75$ ton

Flexibiliteit: Directe verbinding dus 0 km

Milieubelasting: Geschat op hetzelfde als dat van bemande vliegtuigen, dus 8,8 gram per ton*km/100 (Zie hoofdstuk 2)

Kans op verlies of schade: Directe verbinding, dus 0,25%

Betrouwbaarheid: $2,6/3,6 * (0,3+0,15+0,075+0,21*0,5+0,525)+0,225*2,6/3,6*(800/400)^2 = 1,48$
(toelichting op deze getallen staat al in hoofdstuk 4)

Vervolgens zijn er lineaire value functies gebruikt. Dit houdt in dat de beste score op een criterium een value van 100 krijgt en de slechte een value van 0. De afstand van het beste tot het slechtste is hier $40-2,7=37,3$. Telkens wordt de afstand tot het slechtste alternatief bepaald, dit wordt gedeeld door 37,2 en vermenigvuldigt met 100.

Transportmodus	Schip	Vrachtwagen	Bemand vliegtuig	Trein	OVV
Score	40	27,5	2,7	15,3	3,6
Value	0	$(12,5/37,3)*100=34$	100	$(24,7/37,3)*100=66$	$(36,4/37,3)*100=98$

Dit wordt op dezelfde manier gedaan bij alle andere criteria.

Tot slot zijn alle gewichten genormaliseerd, zodat de som van alle gewichten 1 is.

Criterium	Gewicht in swing weights	Genormaliseerd gewicht
Transporttijd	100	$100/210=0,48$
Betrouwbaarheid	50	$50/210=0,24$
Flexibiliteit	15	$15/210=0,07$
Minimaal benodigde lading	15	$15/210=0,07$
Frequentie	15	$15/210=0,07$
Kans op verlies of schade	10	$10/210=0,05$
Milieubelasting	5	$5/210=0,02$
Totaal	210	1

Bijlage 3: Criteria uit de literatuur

Auteur(s)	Gebruikte criteria
Jeffs & Hills (1990)	Kosten, transporttijd, betrouwbaarheid, controle over tijd, controle over locatie, kans op verlies of schade
Cullinane & Toy (2000)	Kosten, transporttijd, betrouwbaarheid, frequentie, flexibiliteit, kans op verlies of schade, controle
Lagoudis, Lalwani, Naim, & King (2002)	Kosten, transporttijd, frequentie, transportvolume
Shinghal & Fowkes (2002)	Kosten, transporttijd, betrouwbaarheid, frequentie
Danielis, Marcucci, & Rotaris (2005)	Kosten, transporttijd, kans op vertraging, kans op verlies of schade
Witlox & Vandaele (2005)	Kosten, transporttijd, betrouwbaarheid, frequentie, flexibiliteit, kans op verlies of schade