



UHASSELT

KNOWLEDGE IN ACTION

Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen

master in de toegepaste economische
wetenschappen: handelsingenieur

Masterthesis

***De impact van vertragingen bij het openbaar vervoer in een geïntegreerd
mobiliteitssysteem***

Sofie Haesevoets

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de toegepaste economische wetenschappen:
handelsingenieur, afstudeerrichting accountancy en financiering

PROMOTOR :

dr. Yves MOLENBRUCH



UHASSELT

KNOWLEDGE IN ACTION

www.uhasselt.be
Universiteit Hasselt
Campus Hasselt:
Martelarenlaan 42 | 3500 Hasselt
Campus Diepenbeek:
Agoralaan Gebouw D | 3590 Diepenbeek

2018
2019



Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen

master in de toegepaste economische
wetenschappen: handelsingenieur

Masterthesis

***De impact van vertragingen bij het openbaar vervoer in een geïntegreerd
mobiliteitssysteem***

Sofie Haesevoets

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de toegepaste economische wetenschappen:
handelsingenieur, afstudeerrichting accountancy en financiering

PROMOTOR :

dr. Yves MOLENBRUCH

Woord vooraf

Deze masterproef werd geschreven als sluitstuk van mijn opleiding Handelsingenieur aan de Universiteit Hasselt, met als afstudeerrichting Finance. Het thema van mijn masterproef situeert zich echter in het domein Operationeel Management en Logistiek. Het kwantitatieve aspect gecombineerd met het actuele thema van deze masterproef gaf de doorslag voor het maken van deze keuze. Dit onderwerp vormde namelijk de ideale combinatie van werken met cijfers en het voeren van een onderzoek met maatschappelijke relevantie. Omdat er tot op heden nog maar weinig onderzoek bestaat naar dit specifieke thema, hoop ik dat ik met deze masterproef mijn steentje heb kunnen bijdragen aan het verkrijgen van nieuwe inzichten of op zijn minst hiermee een aanzet heb kunnen geven voor verder onderzoek.

Graag zou ik ook nog enkele mensen willen bedanken. Zonder hun hulp had het eindresultaat er namelijk helemaal anders uitgezien.

Eerst en vooral wil ik graag mijn promotor dr. Yves Molenbruch bedanken voor zijn ondersteuning en voor de vele momenten die hij heeft vrijgemaakt om te antwoorden op al mijn vragen. Zijn inzichten en advies hebben dit onderzoek naar een hoger niveau gebracht.

Verder zou ik ook mijn ouders, zus en vrienden willen bedanken voor alle steun die ze mij gegeven hebben, niet alleen gedurende het afgelopen jaar, maar gedurende de voorbije vijf jaren. Zij stonden altijd klaar om me raad te geven, ondersteuning te bieden of om te zorgen voor de nodige ontspanning.

Sofie Haesevoets

Samenvatting

Naar een nieuw vervoersmodel

In 2020 wil de Vlaamse Regering evolueren van basismobiliteit naar basisbereikbaarheid. Dit wil zeggen dat er overgeschakeld zal worden van een systeem met een basisaanbod aan openbaar vervoer (dat niet gebaseerd is op de reële vraag) naar een systeem dat meer zal uitgaan van vraaggericht vervoer en dat inzet op het kunnen bereiken van belangrijke maatschappelijke functies. Dit wordt gedaan om profijt te halen uit de voordelen die het combineren van verschillende vervoersvormen met zich meebrengt, alsook om een einde te maken aan een aantal buslijnen die momenteel weinig gebruikt worden en die wel veel geld kosten. In dit systeem zal het openbaar vervoer een onderdeel vormen van het totale mobiliteitsnetwerk, en door de combinatie van verschillende vervoersmodi ontstaat er als het ware een geïntegreerd mobiliteitssysteem. Er zal een mobiliteitscentrale opgericht worden die reizigers zal helpen met het plannen van hun reis. Deze zal de reiziger informeren over de overstappen en met welke modus hij zal reizen.

Vervoer op maat integreren in het openbaar vervoer

Het nieuwe vervoersysteem zal bestaan uit verschillende lagen, en één laag daarvan zal bestaan uit vervoer op maat. Op dit moment bestaat dit soort vervoer voor mensen met een beperkte mobiliteit, zoals ouderen en mindervaliden. Wanneer een klant gebruikmaakt van vervoer op maat, vraagt hij op voorhand een rit aan tussen twee locaties en specificeert hij eveneens een tijdstip waarop hij op zijn bestemming wil aankomen. De aanbieder van het vervoer op maat tracht vervolgens een rittenplanning te maken die voldoet aan alle aanvragen, waarbij hij de operationele kost van het rijden wil minimaliseren en verschillende klanten mag combineren. Om de operationele kosten van deze aanbieders zo laag mogelijk te houden kan het aanbod uitgebreid worden naar reizigers zonder mobiliteitsbeperkingen in combinatie met een beperkter vast aanbod aan openbaar vervoer. Dit haalt namelijk de kosten van duur direct transport naar beneden. In de toekomst zal vervoer op maat een dubbele functie vervullen. Enerzijds zal het zorgen voor ontsluiting voor de gewone gebruiker en anderzijds zal ook doelgroepenvervoer mogelijk zijn.

Men wil dus overstappen op een systeem waarin het makkelijker wordt het openbaar vervoer te gebruiken, aangezien men dit wil promoten vanuit een duurzaamheidsperspectief. De laatste tijd wordt er in de media echter steeds vaker bericht over de afgenomen stiptheid van vervoersmaatschappij De Lijn. Aangezien de congestie op de Vlaamse wegen enkel toeneemt, kan men zich afvragen of de stiptheid zal verbeteren in de toekomst. In de literatuur worden verschillende oorzaken gevonden voor vertragingen zoals bijvoorbeeld congestie, omleidingen en technische storingen. Deze vertragingen bij het openbaar vervoer kunnen een impact hebben op de gehele gemaakte rittenplanning in een geïntegreerd mobiliteitssysteem. Een vertraging kan er namelijk voor zorgen dat een bepaalde aansluiting niet gehaald wordt. Wanneer een bus vertraging oploopt, beïnvloedt dit het schema van het voertuig dat zorgt voor het vervoer op maat. Dit voertuig, dat een klant moet ophalen aan een halte van het openbaar vervoer, moet hier nu namelijk langer wachten en loopt daardoor zelf vertraging op. Deze opgelopen vertraging kan vervolgens de tijdschema's van

de andere reizigers in dat voertuig in het gedrang brengen door het feit dat zij hierdoor bijvoorbeeld een overstap op een andere bus missen. Zo kan een kettingreactie ontstaan in de hele keten.

Kosten voor aanbieders van vervoer op maat bij vertragingen

In het empirisch gedeelte van deze masterproef wordt nagegaan wat de impact is van het in rekening brengen van vertragingen bij het openbaar vervoer op de kosten van de aanbieder van vervoer op maat. De kosten worden hierbij gemeten door de operationele kost van deze aanbieder. Verder wordt er ook nagegaan wat deze vertragingen betekenen voor de gemiddelde reistijd van reizigers, evenals het feit of vertragingen een impact hebben op het percentage van klanten dat gebruik kan maken van het openbaar vervoer.

Verschillende scenario's werden opgesteld met betrekking tot de frequentie van de dienstregeling van het openbaar vervoer, het aantal klanten dat een rit aanvraagt tijdens de spits en de maximale tijd die een klant onderweg wil zijn. Ook vertragingen werden mee opgenomen, waarbij er eveneens verschillende scenario's werden opgesteld op basis van de grootte van de kans op een vertraging. Om de effecten van vertragingen te bestuderen in deze scenario's werd er gebruik gemaakt van een *large neighbourhood search*-algoritme met een periodieke diversificatiefase dat een geïntegreerde planning opstelt van het gehele mobiliteitssysteem. Om deze testen te kunnen uitvoeren in een artificieel gebied, werden twee verschillende soorten datafiles opgesteld, waarbij er rekening gehouden werd met verschillende scenario's om zo te trachten de verscheidenheid die in de realiteit bestaat, zo goed mogelijk weer te geven.

Uit het onderzoek blijkt dat de efficiëntiewinst die ontstaat door de integratie van de twee vervoersvormen, blijft bestaan, zelfs wanneer er vertragingen zijn. Vertragingen bij het openbaar vervoer zorgen er echter wel voor dat er meer ritten enkel door het vervoer op maat uitgevoerd zullen worden en dat er dus bij minder ritten gebruik gemaakt wordt van het openbaar vervoer. Dit betekent dat de aanbieders van vervoer op maat terug meer kilometers zullen afleggen en dat daardoor hun operationele kost zal stijgen. Er komt echter ook naar voren dat er zelfs bij vertragingen nog steeds een kostenvoordeel blijft bestaan ten opzichte van de situatie waarin er geen integratie plaatsvindt. Verder blijkt dat de reistijd van de klanten toeneemt wanneer er vertragingen zijn, waarbij opgemerkt kan worden dat de reistijd voor reizigers met het openbaar vervoer altijd hoger ligt dan voor zij die enkel reizen met het vervoer op maat.

Een andere conclusie die naar voren komt, is het feit dat vertragingen geen zwaardere impact hebben wanneer de frequentie van het openbaar vervoer laag is, wanneer er meer spitsreizigers zijn of wanneer de maximaal toegestane reistijd klein is. Vertragingen hebben in deze verschillende scenario's namelijk eenzelfde effect.

De vertragingen opgenomen in dit onderzoek zijn op voorhand gekend. Deze masterproef schetst dus ongeveer een beeld van de mogelijke invloed die vertragingen kunnen hebben. Wanneer vertragingen pas op het moment zelf bekend raken, kunnen de resultaten anders zijn dan wat hier bekomen wordt, omwille van het feit dat het algoritme nu rekening heeft kunnen houden met de vertragingen. Zo kan een reiziger bijvoorbeeld aan een bushalte afgezet worden nadat de bus

normaal gepasseerd zou zijn, omdat het algoritme weet dat deze persoon nog mee op de bus kan, aangezien de bus later zal aankomen.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	I
Samenvatting	III
Inhoudsopgave	VII
Lijst van figuren	IX
Lijst van tabellen	IX
1. Inleiding	1
1.1 Probleemstelling	1
1.2 Onderzoeksopzet	3
1.2.1 Centrale onderzoeksvraag	3
1.2.2 Deelonderzoeksvraag 1	3
1.2.3 Deelonderzoeksvraag 2	4
1.2.4 Deelonderzoeksvraag 3a	4
1.2.5 Deelonderzoeksvraag 3b	4
1.2.6 Deelonderzoeksvraag 4	4
1.3 Onderzoeksaanpak	5
2. Literatuurstudie	7
2.1 Aanpak literatuurstudie	7
2.2 Maatschappelijke context	7
2.3 Het standaard dial-a-ride probleem	12
2.4 Probleemformulering geïntegreerd DARP	15
2.5 Synchronisatie	17
2.6 Oorzaken van vertragingen bij het openbaar vervoer	17
2.7 Hoe worden deze vertragingen opgenomen in de huidige literatuur?	19
3. Empirisch gedeelte	23
3.1 Aanpak empirisch gedeelte	23
3.2 Datafiles	23
3.3 Large neighbourhood search	26
3.4 Resultaten	29
3.4.1 Algemeen	29
3.4.2 Resultaten globaal scenario	32
3.4.3 Resultaten voor totale afstand van de DAR-voertuigen	35
3.4.4 Resultaten voor gemiddelde reistijd	41
3.4.5 Resultaten voor percentage openbaar vervoer	46
3.4.6 Conclusie	49
4. Conclusie en discussie	51
4.1 Conclusie	51
4.2 Beperkingen	53

4.3 Aanbevelingen verder onderzoek	54
4.4 Beleidsaanbevelingen.....	55
4.5 Aanbevelingen voor DAR-aanbieders.....	57
4.6 Haalbaarheid basisbereikbaarheid.....	58
5. Referenties	61
6. Bijlagen.....	65
Bijlage 1. Mathematische formulering van de probleemformulering van het geïntegreerd DARP	65
Bijlage 2. Kernel density plots en Q-Q plots voor het globaal scenario	68
Bijlage 3. Kernel density plot en Q-Q plot voor residuals percentage openbaar vervoer.....	71

Lijst van figuren

Figuur 1. Integratie versus geen integratie.....	2
Figuur 2. Integratie openbaar vervoer en DAR-dienst versus geen integratie	11
Figuur 3. Vervoerregio's Vlaanderen	11
Figuur 4. Het geïntegreerd DARP ten opzichte van het standaard DARP	15
Figuur 5. Impact vertragingen op rittenplanning	18
Figuur 6. Weergave openbaarvervoernetwerk en geclusterde klantlocaties	24
Figuur 7. Schematische voorstelling van het LNS-algoritme.....	27
Figuur 8. Totale afstand in verhouding tot de frequentie OV	38
Figuur 9. Totale afstand in verhouding tot het aantal spitsreizigers	38
Figuur 10. Totale afstand in verhouding tot de maximale reistijdfactor	38
Figuur 11. <i>Kernel density estimate</i> en Q-Q plot van de <i>residuals</i>	39
Figuur 12. Gemiddelde reistijd in verhouding tot de frequentie OV	42
Figuur 13. Gemiddelde reistijd in verhouding tot het aantal spitsreizigers	42
Figuur 14. Gemiddelde reistijd in verhouding tot de maximale reistijdfactor	42
Figuur 15. <i>Kernel density estimate</i> en Q-Q plot van de <i>residuals</i>	44
Figuur 16. Percentage OV in verhouding tot de frequentie van het OV	47
Figuur 17. Percentage OV in verhouding tot het aantal spitsreizigers.....	47
Figuur 18. Percentage OV in verhouding tot de maximale reistijdfactor.....	47
Figuur 19. <i>Kernel density plot</i> van <i>residuals</i> globaal scenario voor afstand DAR-voertuigen.....	68
Figuur 20. Q-Q plot van <i>residuals</i> globaal scenario voor afstand DAR-voertuigen	68
Figuur 21. <i>Kernel density plot</i> van <i>residuals</i> globaal scenario voor gemiddelde reistijd.....	69
Figuur 22. Q-Q plot van <i>residuals</i> globaal scenario voor gemiddelde reistijd	69
Figuur 23. <i>Kernel density plot</i> van <i>residuals</i> globaal scenario voor percentage openbaar vervoer	70
Figuur 24. Q-Q plot van <i>residuals</i> globaal scenario voor percentage openbaar vervoer	70
Figuur 25. <i>Kernel density plot</i> van <i>residuals</i> percentage openbaar vervoer.....	71
Figuur 26. Q-Q plot van <i>residuals</i> percentage openbaar vervoer	71

Lijst van tabellen

Tabel 1. Overzicht van de verschillende scenario's.....	26
Tabel 2. Resultaten globaal scenario: geen integratie met openbaar vervoer, geen vertragingen en wel vertragingen bij het openbaar vervoer.....	33
Tabel 3. Totale afstand DAR-voertuigen (in km) op basis van verschillende factoren en verschillende kansen op vertragingen van het openbaar vervoer	36
Tabel 4. Gemiddelde reistijd (in min) op basis van verschillende factoren en verschillende kansen op vertragingen van het openbaar vervoer	41
Tabel 5. Gemiddelde reistijd (in min) op basis van de verschillende factoren en het feit of een reiziger het openbaar vervoer al dan niet gebruikt.....	45
Tabel 6. Percentage openbaar vervoer op basis van verschillende factoren en verschillende kansen op vertragingen van het openbaar vervoer	48

1. Inleiding

1.1 Probleemstelling

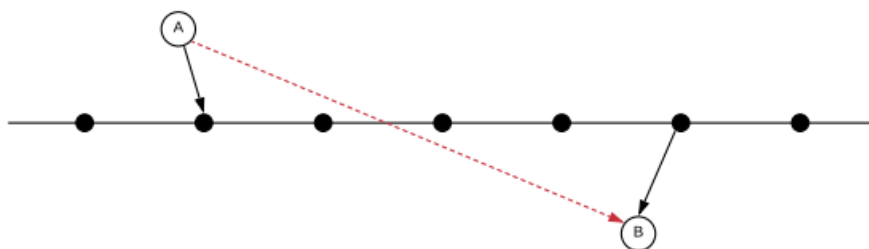
Op 20 juli 2018 werd het decreet basisbereikbaarheid door de Vlaamse Regering principieel goedgekeurd als vervanging voor het mobiliteitsdecreet. Dit werd in een ontwerp gegoten en op 14 januari 2019 werd 'het ontwerp van decreet betreffende de basisbereikbaarheid' gepubliceerd door de Vlaamse Regering (Ontwerp van decreet basisbereikbaarheid, 14 januari 2019). Op 3 april 2019 werd dit vervolgens aangenomen door de plenaire vergadering en op 26 april werd het bekrachtigd en afgekondigd. Het decreet houdt in dat er een omschakeling zal plaatsvinden van basismobiliteit (uit het decreet personenvervoer) naar basisbereikbaarheid. In de huidige situatie van basismobiliteit wordt er in feite een basisaanbod aan openbaar vervoer gecreëerd voor de reizigers, waar deze vervolgens op kunnen ingaan. Basisbereikbaarheid daarentegen, gaat uit van een vraaggericht systeem voor het voorzien van vervoer en stapt dus af van de blinde aanbodpolitiek die nu heerst. In de huidige situatie wordt er namelijk geen rekening gehouden met de samenhang tussen verschillende vervoersvormen. In het nieuwe systeem wil men de vraag naar transport laten bepalen hoeveel transport er zal zijn. Hierbij zal de term *combimobiliteit* een centrale rol spelen. Daarmee wordt bedoeld dat een reiziger om van plaats A naar plaats B te geraken verschillende vervoersmiddelen combineert. De vervoersmiddelen zijn dan niet meer elkaars concurrent, maar vullen elkaar aan. Door deze combinatie van vervoersmiddelen zal er een nood ontstaan aan goed georganiseerde knooppunten waar er gemakkelijk gewisseld kan worden tussen verschillende vervoersmodi. Op de website die aangemaakt werd door het Departement Mobiliteit en Openbare Werken stelt men dat lokale besturen in de toekomst dan ook een grotere rol zullen krijgen om dit allemaal te verwezenlijken (<https://www.basisbereikbaarheid.be/>). Lokale besturen weten immers vaak beter welke behoeften er zijn en kunnen hier bijgevolg beter op inspelen. Gemeenten zullen samen met gewestelijke instanties zoals De Lijn, De Vlaamse Waterweg, Agentschap Wegen en Verkeer en het Departement Mobiliteit en Openbare Werken, de investeringen bepalen om zo te werken aan een betere verkeersveiligheid en bereikbaarheid van de regio.

Naast de gekende openbare vervoersvormen zoals trein, tram en bus, zal vervoer op maat een extra toevoeging vormen aan het mobiliteitsnetwerk bij basisbereikbaarheid. Dit vervoer op maat zou ingevuld kunnen worden door dial-a-ride diensten (DAR-diensten). Deze worden voor het eerst geïntroduceerd en gedefinieerd door Cordeau en Laporte (2003). Het zijn diensten die vraagafhankelijk deur-aan-deurvervoer voorzien voor personen met een beperkte mobiliteit, zoals bijvoorbeeld ouderen en mindervaliden. Hoewel de focus van deze dienst zich op dit moment voornamelijk richt op deze groep, zou het door het ingaan van basisbereikbaarheid en door een algemene toename naar vraagafhankelijk vervoer nuttig kunnen zijn om de doelgroep van deze diensten uit te breiden naar personen zonder mobiliteitsbeperkingen. Bij de ingang van het decreet zal het namelijk niet meer vanzelfsprekend zijn dat elke Vlaming een bushalte op maximaal 750 meter van zijn deur heeft. Dit omdat men komaf wil maken met de vele nutteloze haltes en lege buslijnen die er op dit moment zijn, door een gebrek aan vraag ernaar. Doordat haltes niet meer zo dichtbij liggen, zal vervoer op maat noodzakelijk worden om het voor- en natransport naar haltes

van het openbaar vervoer te voorzien, wil men de verplaatsing niet met de auto maken. Een efficiënt en performant openbaarvervoernetwerk zou daarenboven kunnen helpen om de transitie naar *Mobility as a Service* te vergemakkelijken. Dit is de shift van het aankopen van vervoersmodi, zoals bijvoorbeeld een auto, naar het gebruikmaken van een aanbod aan modi, zoals bijvoorbeeld deelauto's. Deze dienst heeft zeker een enorm potentieel, gezien de alsmaar toenemende files en de raad om de auto zo vaak mogelijk thuis te laten. Wanneer het openbaar vervoer efficiënter en performanter wordt, zou het bijgevolg makkelijker kunnen zijn om te beslissen geen auto meer aan te kopen en te kiezen voor het openbaar vervoer als alternatief.

Het transportprobleem dat momenteel bestaat in België kan men toeschrijven aan het feit dat de vraag naar vervoer en mobiliteit de laatste jaren enorm is toegenomen. Er bevinden zich steeds meer en meer auto's op de weg en dat resulteert in meer filevorming. Uit cijfers van het Vlaams Verkeerscentrum blijkt dat er in 2018 dagelijks gemiddeld 150 km file in de ochtendspits was en 123 km in de avondspits (Hoornaert, 2019). De grotere filevorming is tevens een probleem waar dial-a-ride diensten rekening mee moeten houden, aangezien dit zorgt voor vertragingen in de voorziene reistijden.

Er is reeds door onder meer Cordeau en Laporte (2003), Fu (2002) ... onderzoek verricht naar het opstellen van rittenplanningen voor dit vraagafhankelijk vervoer. Dit had echter tot nog toe voornamelijk als focus de dienst op zichzelf en er bestaat nog maar weinig onderzoek dat zich bezighoudt met het integreren van openbaar vervoer en deze vraagafhankelijke diensten. Door de twee vervoersvormen te integreren wordt het mogelijk dat een gedeelte van de rit afgelegd wordt op het openbaarvervoernetwerk en hoeft het DAR-voertuig niet noodzakelijk de hele afstand af te leggen. Hierbij is het echter wel belangrijk dat er synchronisatie tussen de twee bestaat. Dit wil zeggen dat wanneer er een combinatie gemaakt wordt tussen de twee vervoersmodi, deze ook op elkaar afgestemd worden qua timing. In Figuur 1 wordt een schets weergegeven van hoe de integratie eruitziet. In plaats van dat één DAR-voertuig de volledige rit aflegt van A naar B, weergegeven door de rode stippellijn, wordt de route nu afgelegd door twee DAR-voertuigen en het openbaar vervoer, weergegeven door de zwarte lijnen. De afstand afgelegd door de DAR-voertuigen is in het geïntegreerde systeem duidelijk korter.



Figuur 1. Integratie versus geen integratie

Het integreren van het openbaar vervoer in vervoer op maat brengt natuurlijk een aantal extra complicaties met zich mee, aangezien bussen en treinen rijden volgens een vaststaand schema en wel eens vertraging kunnen oplopen. In 2017 reed namelijk meer dan de helft van de bussen en trams van De Lijn met vertraging (Poppelmonde, 2018). Slechts 46 procent reed op tijd. Ook het openbaar vervoer ondervindt namelijk hinder van de toenemende congestie op de wegen. In een systeem waar er gewerkt wordt met een combinatie van verschillende vervoersmiddelen is het dan ook van belang dat de stiptheid toeneemt en dat de aanbieder van dial-a-ride diensten beschikt over een min of meer flexibele planningstool die toelaat om de *schedules* van de dial-a-ride voertuigen in reële tijd aan te passen.

1.2 Onderzoeksopzet

1.2.1 Centrale onderzoeksvraag

In deze masterproef zal er getracht worden vertragingen bij het openbaar vervoer te incorporeren in geïntegreerde dial-a-ride problemen (DARP). Gezien de gestage toename van het aantal kilometer file elk jaar en de erbarmelijke stiptheid van het openbaar vervoer, is het namelijk van belang hier rekening mee te houden bij het creëren van een rittenplanningsalgoritme. Voorlopig is er enkel een exacte oplossingsmethode voor kleinschalige voorbeelden van het geïntegreerde DARP voorhanden (Posada, Andersson, & Häll, 2017). Deze zal in de literatuurstudie kort besproken worden en in het empirisch gedeelte zal er gebruik gemaakt worden van een metaheuristiek die het mogelijk maakt om problemen op een grotere schaal op te lossen. Daarom zal de centrale onderzoeksvraag van deze masterproef als volgt zijn: *"Hoe worden vertragingen het best opgenomen in geïntegreerde dial-a-ride problemen en wat is hun impact op de werkingskosten van de DAR-aanbieder?"*

Om een antwoord te kunnen formuleren op deze onderzoeksvraag, zal er gebruik gemaakt worden van enkele deelonderzoeksvragen.

1.2.2 Deelonderzoeksvraag 1

"Wat zijn de verwachte voordelen van een vraaggestuurd, gelaagd vervoernetwerk ten opzichte van een traditioneel openbaarvervoernetwerk?"

Een eerste deelonderzoeksvraag heeft betrekking op de mobiliteitssituatie in Vlaanderen. De huidige situatie zal besproken worden en hoe deze zal veranderen bij aanvang van het nieuwe decreet basisbereikbaarheid. De uitgangspunten, die vervat zitten in de conceptnota 'Met basisbereikbaarheid naar een efficiënt en aantrekkelijk vervoersmodel in Vlaanderen dat optimaal tegemoetkomt aan de globale en lokale vervoersvraag' (conceptnota Vlaamse Regering, 18 december 2015), zullen besproken worden, alsook de timing van het ingaan van deze plannen. Dit is een meer theoretische deelonderzoeksvraag en zal daarom besproken worden in de literatuurstudie.

1.2.3 Deelonderzoeksvraag 2

"Wat zijn de kenmerken van een geïntegreerd DARP ten opzichte van een standalone probleem?"

Bij deze tweede deelonderzoeksvraag zal er getracht worden te achterhalen wat de verschillen zijn tussen een geïntegreerd DARP en een standaard DARP. Hiertoe zullen de belangrijkste kenmerken van beide modellen voorgesteld worden. Aangezien het empirisch gedeelte van deze masterproef zal focussen op het geïntegreerde DARP, zal ook de probleemformulering van Posada et al. (2017) kort toegelicht worden.

Ook het belang van synchronisatie zal in de literatuurstudie besproken worden. Synchronisatie wil zeggen dat wanneer er een combinatie gemaakt wordt tussen openbaar vervoer en dial-a-ride diensten, deze twee ook op elkaar afgestemd worden. Hiermee bedoelt men dat wanneer iemand een stuk van de route met de bus aflegt, er zowel een DAR-voertuig is dat deze persoon op tijd aan een bepaalde halte afzet alsook dat een ander DAR-voertuig hem op tijd aan een andere halte ophaalt.

1.2.4 Deelonderzoeksvraag 3a

"Wat zijn de oorzaken van vertragingen bij het openbaar vervoer?"

In deze deelonderzoeksvraag zal nagegaan worden welke factoren vertragingen veroorzaken bij het openbaar vervoer. In de literatuurstudie zal er gezocht worden naar mogelijke verklaringen die reeds in de literatuur besproken zijn. Gezien de kwantitatieve aard van deze masterproef zal deze deelonderzoeksvraag zich beperken tot de literatuurstudie.

1.2.5 Deelonderzoeksvraag 3b

"Hoe worden deze vertragingen bij het openbaar vervoer het best gemodelleerd?"

Naast de oorzaken en gevolgen van deze vertragingen zal er ook onderzocht worden hoe deze vertragingen dan het best geïncorporeerd worden in het model. Eerst zal er gekeken worden hoe dit in de beschikbare literatuur gedaan wordt en dit zal besproken worden in de literatuurstudie. In het empirisch gedeelte zullen vertragingen vervolgens mee opgenomen worden in het probleem.

1.2.6 Deelonderzoeksvraag 4

"Wat is de impact van vertragingen op de rittenplanning en wat zijn de gevolgen voor de gebruikers?"

Een laatste deelonderzoeksvraag zal nagaan welke impact vertragingen uitoefenen op de rittenplanning en welke gevolgen dit heeft voor de gebruikers. In het empirisch gedeelte zal de impact op de operationele kost van DAR-aanbieders nagegaan worden, alsook welke impact zij bijvoorbeeld hebben op de reistijd van een klant, aangezien dit een belangrijke maatstaf is voor de kwaliteit van de service. De impact van verschillende kansen op vertragingen op de werking van DAR-diensten zal onderzocht worden. Hiervoor zal een scenario zonder vertragingen vergeleken worden met een scenario waarbij er wel vertragingen plaatsvinden.

1.3 Onderzoeksaanpak

Om een geschikt antwoord te vinden op de onderzoeksvragen, zal er gewerkt worden met verschillende soorten onderzoek. Deze masterproef is deels exploratief omdat er slechts weinig onderzoek bestaat naar geïntegreerde DARP en naar de oorzaken en gevolgen van vertragingen bij het openbaar vervoer. In de literatuurstudie zal dus eerst het probleem in kaart gebracht worden. Hierbij zullen verschillende varianten van het DARP besproken worden, alsook het geïntegreerde DARP. Daarnaast zullen in de literatuurstudie ook de oorzaken en gevolgen van vertragingen bij het openbaar vervoer nagegaan en besproken worden. Dit deel is eerder kwalitatief van aard. Het empirisch gedeelte van deze masterproef zal meer focussen op het kwantitatieve aspect, waarbij een metaheuristisch beschreven zal worden die grotere geïntegreerde DARP kan oplossen. Hierbij zal er eerst een basisscenario opgelost worden, waarbij er een algemene vergelijking gemaakt zal worden tussen een scenario zonder en een scenario met vertragingen. Vervolgens zal er een verder onderscheid gemaakt worden om de impact van bijvoorbeeld de frequentie van de dienstregeling het openbaar vervoer of de kans op een vertraging na te gaan.

2. Literatuurstudie

2.1 Aanpak literatuurstudie

In de literatuurstudie zal er eerst in sectie 2.2 de maatschappelijke context besproken worden, waarin de huidige evoluties in het Vlaamse mobiliteitsbeleid aan bod zullen komen, alsook de relevantie van deze thesis in de bestaande context. Sectie 2.3 zal daarna kort het standaard dial-a-ride probleem (DARP) schetsen, evenals enkele veelvoorkomende varianten die interessant zijn voor het empirisch gedeelte. De voornaamste oplossingsmethoden zullen aangehaald worden. Aangezien de focus van deze masterproef ligt op het geïntegreerde DARP, zal dit model vervolgens in sectie 2.4 uitvoeriger besproken worden. Hierbij zal ook de probleemformulering behandeld worden. Hierna wordt in sectie 2.5 het concept synchronisatie verder uitgelegd, aangezien dit een erg belangrijk concept is bij de integratie van het openbaar vervoer in het standaard DARP. Sectie 2.6 zal vervolgens de oorzaken en gevolgen van vertragingen bij het openbaar vervoer bespreken en in sectie 2.7 zal gekeken worden hoe deze geïncorporeerd worden in de bestaande literatuur.

Bij het zoeken naar relevante literatuur werden volgende trefwoorden gebruikt: (*integrated*) *dial-a-ride problems*, *synchronization*, *vehicle routing*, *public transport* ... Er werd gewerkt met online databanken zoals EBSCOhost, Web of Science ... Daarnaast werd ook Google Scholar gebruikt als zoekmachine. Naast het gebruik van deze online databanken werd er ook aan *backward literature search* gedaan, waarbij de literatuurlijsten uit gevonden artikels werden gebruikt om nieuwe artikels te vinden.

2.2 Maatschappelijke context

In de conceptnota 'Met basisbereikbaarheid naar een efficiënt en aantrekkelijk vervoersmodel in Vlaanderen dat optimaal tegemoetkomt aan de globale en lokale vervoersvraag' die op 18 december 2015 werd goedgekeurd door de Vlaamse Regering, wordt aangehaald dat een sterk openbaar vervoer een belangrijke schakel vormt in de gehele mobiliteit en dat dit de sociaaleconomische ontwikkeling van een regio kan bevorderen (conceptnota Vlaamse Regering, 18 december 2015). Mobiliteit werd voorheen vaak bekeken als een losstaand gegeven, waarbij geen rekening werd gehouden met de samenhang tussen de verschillende vervoersmodi en met de eventuele voordelen die combimobiliteit (i.e. het overstappen tussen verschillende vervoersmiddelen) kan verschaffen. De verschillende vervoersvormen zijn op dit moment nog te vaak elkaars concurrent.

Het concept basisbereikbaarheid dat tegen 2020 de basis zal vormen van een vernieuwd mobiliteitsbeleid, vervangt het sinds 20 april 2001 in voege decreet basismobiliteit. Het concept basismobiliteit wordt in de huidige conceptnota als volgt gedefinieerd: "Basismobiliteit is het principe uit het huidige decreet Personenvervoer dat een basisaanbod aan openbaar vervoer voorschrijft. Het geeft recht op een gegarandeerd aanbod aan openbaar vervoer." Door dit gegarandeerd aanbod in de huidige situatie van basismobiliteit is er te weinig integratie tussen de verschillende vervoersvormen, waardoor het vaak moeilijk is openbaar vervoerdiensten te combineren met vervoer op maat. Dit vervoer op maat doet zich in deze masterproef voor in de vorm van dial-a-ride diensten.

Dit zijn diensten die vraagafhankelijk vervoer voorzien voor personen met een beperkte mobiliteit, zoals bijvoorbeeld ouderen en mindervaliden. De vereiste bij basismobiliteit dat iedere Vlaming een bushalte op maximaal 750 meter van zijn deur zal hebben, vormt een rem op een efficiënte werking van het openbaar vervoer en zorgt er eveneens voor dat de kosten hoog oplopen. De vereiste zorgde namelijk voor veel lege bussen en een enorme toename van de belastingdotatie voor De Lijn. Uit het persbericht 'Met basisbereikbaarheid naar betere mobiliteit' blijkt namelijk dat deze is toegenomen van ongeveer 400 miljoen euro in 2000 naar 1,2 miljard euro in 2014 ("Met basisbereikbaarheid naar betere mobiliteit," 2018). De geplande overgang naar een vraaggestuurd vervoernetwerk maakt het nemen van het openbaar vervoer niet alleen aantrekkelijker doordat de flexibiliteit ervan vergroot zal worden, het werkt ook kostenbesparend doordat er minder lege bussen zullen rondrijden. Er werd namelijk geconstateerd dat er onvoldoende voldaan wordt aan de werkelijke vraag. Openbaar vervoer wordt momenteel namelijk op een 'blinde' manier ingezet, wat leidt tot een te groot aanbod op sommige plaatsen alsook tot een aanbod dat ontoereikend is op andere plaatsen. Dit brengt een hoge kostprijs met zich mee. Het probleem van lege buslijnen situeert zich vooral in dunbevolkte gebieden, waar er sowieso al minder bussen rijden en haltes eveneens verder uit elkaar liggen. In deze rurale gebieden is het openbaar vervoer niet winstgevend en is er op dit moment onvoldoende flexibiliteit om vervoerstromen op een meer kostenefficiënte manier in te vullen doordat de samenhang met andere modi ontbreekt.

Door een gebrekkige toegankelijkheid van haltes ontstonden er naast de bestaande openbaar vervoerregeling daarom op verschillende plaatsen initiatieven die zich richten op een specifieke vervoersvraag. Een voorbeeld hiervan zijn Minder Mobielen Centrales. Deze dienst wordt op de website voorgesteld als een dienstverlening die wordt aangeboden door de gemeente, het OCMW of een andere organisatie, en die als doel heeft verplaatsingen mogelijk te maken voor mensen met een beperkte mobiliteit en een beperkt inkomen (<https://www.mindermobielencentrale.be/>). Hierbij wordt er beroep gedaan op vrijwilligers. Daarnaast bestaan er ook verscheidene privéinitiatieven, zoals bijvoorbeeld Taxi Hendriks, die onder meer aangepast personenvervoer aanbieden. Deze verschillende initiatieven zijn vandaag de dag niet geïntegreerd, wat leidt tot een suboptimale inzet van materieel en mensen. Het is voor de overheid niet zinvol om in deze gebieden zowel het openbaar vervoer als DAR-diensten te subsidiëren die momenteel onafhankelijk van elkaar opereren. Een integratie van verschillende vervoersmodi zou een hele verbetering kunnen betekenen en kan er daarnaast voor zorgen dat er een modale shift plaatsvindt in het personenvervoer. Ook wordt er momenteel onvoldoende rekening gehouden met een goede koppeling tussen infrastructuur, ruimtelijke inrichting en vervoer. In de conceptnota 'Met basisbereikbaarheid naar een efficiënt en aantrekkelijk vervoersmodel in Vlaanderen dat optimaal tegemoetkomt aan de globale en lokale vervoersvraag' wordt de ruimtelijke organisatie in Vlaanderen dan ook beschreven door een verspreid bebouwingspatroon en een hoge graad van lintbebouwing. Hierbij wordt gesteld dat woonkernen en handelszaken vaak van elkaar gescheiden zijn en dat er een oplossing moet komen voor dit probleem van ontsluiting (conceptnota Vlaamse Regering, 18 december 2015).

Het uitgangspunt van basisbereikbaarheid is het kunnen bereiken van belangrijke maatschappelijke functies op basis van een vraaggericht systeem door middel van een optimale inzet van middelen. Hierbij zal uitgegaan worden van de vraag en wordt het aanbodperspectief achterwege gelaten. De idee hierachter is het opzetten van een performanter vervoersysteem dat de bereikbaarheid vergroot en hierdoor meer mensen overtuigt over te stappen op het openbaar vervoer. Het openbaar vervoer zal niet meer als losstaand gezien worden, maar als een onderdeel van een mobiliteitsnetwerk bestaande uit verschillende vervoersmiddelen. De inspiratie voor het model voor vraaggestuurd vervoer dat in de toekomst in Vlaanderen gehanteerd zal worden, werd gevonden in Denemarken (Mobiliteitsbrief 174 – Basisbereikbaarheid). Daar is FlexDanmark, een maatschappij in eigendom van Deense openbaarvervoersorganisaties, verantwoordelijk voor het plannen en coördineren van het vraaggestuurd vervoer, zonder dat het zelf ritten uitvoert. FlexDanmark besteedt de ritten namelijk uit aan andere vervoersbedrijven. De redenen voor het oprichten van deze dienst waren een lagere totale kost voor vervoer, een verbetering van het eigen systeem en een betere service voor de reiziger. De ritten worden verdeeld over de verschillende soorten voertuigen afhankelijk van de regio, beschikbaarheid en noden van de klant. Het model tracht dan ook elke verplaatsing te optimaliseren. Een reiziger die een verzoek plaatst, kan een aantal parameters ingeven waarmee de rit gepland zal worden. Hoe flexibeler deze persoon zich hierbij opstelt, hoe goedkoper de rit wordt. Door dit initiatief kunnen reizigers volgens Lynott (2019) transport verkrijgen aan een prijs die betaalbaarder is dan het nemen van een taxi, omdat FlexDanmark andere reizigers kan identificeren die een gelijkaardige trip willen maken.

In de Vlaamse context zal deze functie vervuld worden door de mobiliteitscentrale. Deze zal de reiziger helpen bij het plannen van zijn verplaatsing. Op de website die door het Departement Mobiliteit en Openbare werken werd aangemaakt, wordt gesteld dat deze dienst laat weten met welke vervoersmodus een reiziger zich het best verplaatst en waar de overstappen zich bevinden (<https://www.basisbereikbaarheid.be/faq.php>). Deze centrale zal kijken of er zich openbaarvervoernetwerken bevinden op de door de reiziger geplande rit en afhankelijk daarvan een rit bepalen die gebruik maakt van het openbaar vervoer of enkel van vervoer op maat. Het is ook deze instantie die idealiter de overstaplocaties van een klant bepaalt in functie van het optimaliseren van de globale planning. Deze dienst zal aanvankelijk enkel informatie verlenen over de rit en deze reserveren. Tickets kopen zal nog niet mogelijk zijn. De dienst zal zowel gebruikt kunnen worden door personen zonder beperking als door mindervaliden. Om dit allemaal te verwezenlijken is er natuurlijk nood aan een performant algoritme dat alle ritten op een optimale manier inplant. Om te komen tot dit algoritme zal eerst het standaard dial-a-ride probleem uitgelegd worden, waarna een toegepast model bekeken zal worden voor de specifieke integratie van het openbaar vervoer. Deze masterproef zal enkele reeds bestaande algoritmes bespreken en in sectie 3 zal er zelf een algoritme behandeld worden.

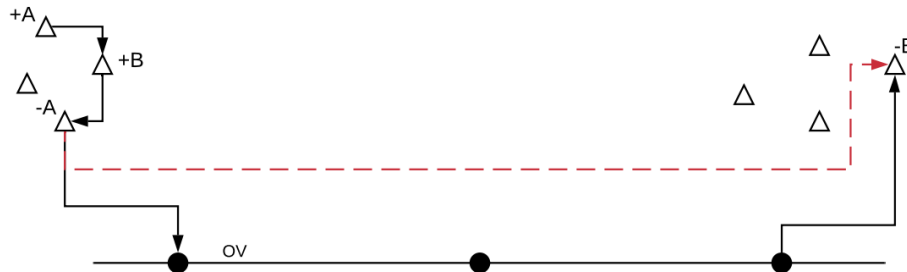
Toegepast op het Vlaamse niveau zal er om de doelstelling van basisbereikbaarheid te bereiken, een gelaagd vervoermodel komen, bestaande uit een treinnet, kernnet (voor- en interstedelijke verbindingen), aanvullend net (verbindingen naar buitenwijken en kleinere kernen) en vervoer op maat. Het kernnet en aanvullend net zullen verzorgd worden door De Lijn en lokale initiatieven zijn terug te vinden op het niveau 'vervoer op maat'. In dit Vlaamse mobiliteitsnetwerk zullen vervolgens

knooppunten voorzien worden waar er gewisseld kan worden tussen verschillende vervoersmodi. Een goede synchronisatie binnen dit vervoermodel is dan ook belangrijk. Hiermee wordt bedoeld dat wanneer een reiziger een deel van de route met het openbaar vervoer aflegt, er zowel een DAR-voertuig deze persoon op tijd aan een bepaalde halte afzet, alsook dat een ander voertuig op tijd klaarstaat om hem op te pikken aan een andere halte. Een extra probleem dat bij deze afstemming opduikt, is het feit dat bussen volgens een vaststaand schema rijden en wel eens te maken kunnen hebben met vertragingen door onder meer toenemende congestie op de wegen, technische storingen of vertragingen aan verkeerslichten. Dit kan vertragingen in de volledige rittenplanning teweegbrengen, omdat bijvoorbeeld aansluitingen gemist worden.

Voor een goede werking van het openbaarvervoernetwerk in Vlaanderen zal een goede afstemming met de NMBS noodzakelijk zijn, vooral wat betreft verbindingen en knooppunten. Aangezien de NMBS een nationale bevoegdheid is en dit voor mogelijke complicaties kan zorgen, werd de mogelijkheid gecreëerd om een aanvullend aanbod tussen centrumsteden te verwezenlijken door het verbod op het inleggen van busverbindingen door privémaatschappijen op te heffen (<https://departement-mow.vlaanderen.be/nl/news/met-basisbereikbaarheid-naar-betere-mobiliteit>). Het kernnet zal dus een aanvulling vormen op het treinnet om zo te voldoen aan de hoge vraag op grote assen. Kernen zullen verbonden worden, alsook centraal gelegen attractiepolen. Het aanvullend net vormt dan een ondersteuning op het kernnet door verbindingen aan te bieden tussen kleinere steden en door binnen steden verbindingen te vormen met de lijnen van het kernnet. Woon-werk- en woon-schoolvervoer (i.e. spitsuurritten) behoren ook tot dit net. De laatste schakel in het model bevat lokale initiatieven, die zo een antwoord bieden op lokale noden. Mogelijke problemen die kunnen optreden bij aanvang van dit gecombineerde netwerk, zijn de integratie van tickets en tarieven. Een overzicht van de prijs op één plaats en een ticket dat geldig is op alle vervoersmodi, is onontbeerlijk. Het is namelijk niet praktisch wanneer informatie zich bevindt in verschillende toepassingen, waardoor men al snel het overzicht verliest. Ook de coördinatie van deze systemen is erg belangrijk, omdat, zoals hierboven aangehaald, vertragingen van een bepaalde vervoersmodus voor verstoringen in de gehele rittenplanning kunnen zorgen. Voor dit laatste probleem kan een geïntegreerd model een oplossing bieden.

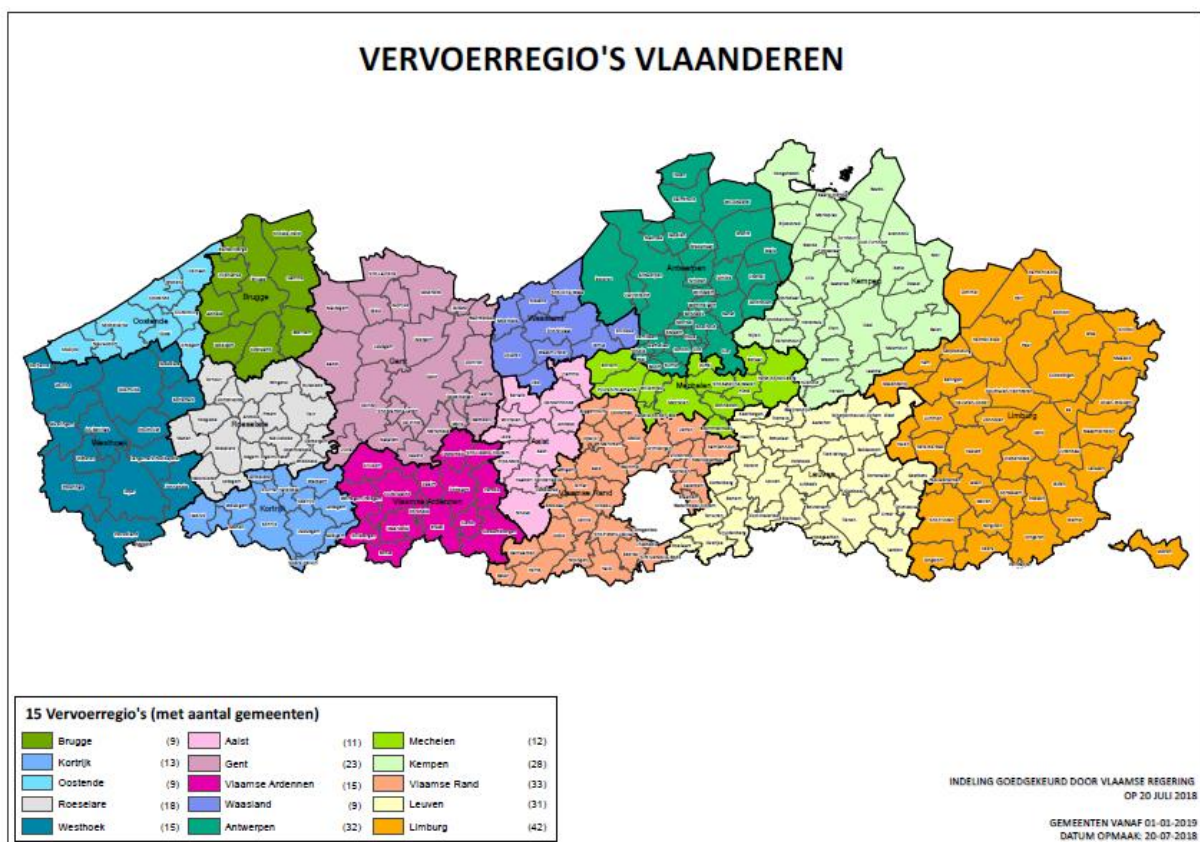
In Figuur 2 op de volgende pagina wordt een voorbeeld gegeven van een combinatie van DAR-diensten en het openbaar vervoer. De driehoeken geven ophaalplaatsen weer in een dorpskern en de cirkels haltes van het openbaar vervoer. De zwarte lijn geeft de rit weer wanneer er een combinatie gemaakt wordt van de twee vervoersmodi. Verscheidene personen worden opgehaald met een DAR-voertuig en vervolgens naar een halte van het openbaar vervoer gebracht, van waaruit zij het vervolg van hun rit met het openbaar vervoer zullen nemen. Wanneer ze afstappen, zal een ander DAR-voertuig klaarstaan om hen naar hun eindbestemming te brengen. De rode stippellijn geeft het traject van een DAR-voertuig weer wanneer er geen gebruik gemaakt wordt van het openbaar vervoer. Deze figuur geeft duidelijk weer dat het maken van een combinatie efficiënter is, aangezien de afstand die beide DAR-voertuigen afleggen veel kleiner is dan de afstand die één DAR-voertuig zou moeten afleggen wanneer er geen combinatie gemaakt wordt. Als er daarenboven geen reiziger is die ongeveer dezelfde verplaatsing in de andere richting wil maken, komt er eveneens nog een retourrit bovenop waarbij niemand vervoerd wordt. Bij het maken van de keuze om DAR-

diensten te combineren met het openbaar vervoer wordt er zeker ook rekening gehouden met de tijdsvoorkeuren van de reiziger en eventuele omwegen die hij maakt door het maken van de combinatie.



Figuur 2. Integratie openbaar vervoer en DAR-dienst versus geen integratie

Om dit alles te realiseren, zal Vlaanderen opgedeeld worden in vijftien vervoerregio's, zoals weergegeven in Figuur 3 (bron: <https://www.basisbereikbaarheid.be/>), die werden samengesteld op basis van reële en potentiële vervoerstromen. Bij het samenstellen van deze regio's werd er ook gekeken naar de regionale clusters die zich in de realiteit voordoen (<https://www.mobielvlaanderen.be/overheden/artikel.php?nav=10&mbnr=185&id=2190>). Het verplaatsingsgedrag in Vlaanderen doet zich namelijk voor op een regionale schaal.



Figuur 3. Vervoerregio's Vlaanderen

In de verschillende regio's zullen de gemeenten een samenhangend geheel vormen inzake mobiliteit en zal er een afstemming op de specifieke vraag plaatsvinden. Er zal uitgegaan worden van een regionale visie en er zal dus niet meer op gemeentelijk niveau gewerkt worden. Ook de realisatie van basisbereikbaarheid zal in elke regio geëvalueerd worden. Het is de bedoeling dat de vervoerregio's flexibele organen worden die inspelen op regionale vervoersvragen door via een globale mobiliteitsbenadering (dit wil zeggen: rekening houdend met alle mogelijke manieren waarop iemand zich kan verplaatsen) een optimale bereikbaarheid te garanderen.

Wanneer vervolgens de vooropgestelde timing bekeken wordt, zoals weergegeven op de site van het Departement Mobiliteit en Openbare Werken (<https://www.basisbereikbaarheid.be/uitrol.php>), wordt vastgesteld dat er in de zomer van 2018 reeds gestart werd met drie proefregio's (meer bepaald Aalst, Mechelen en Westhoek) en dat het decreet ook principieel werd goedgekeurd op 20 juli 2018. In het najaar van 2018 werd er gestart met de opstart van de vijftien vervoerregio's. Op 3 april 2019 werd het decreet basisbereikbaarheid vervolgens aangenomen door de plenaire vergadering. Voor 2019 staat verder nog het uittekenen van het netwerk openbaar vervoer gepland, zodat basisbereikbaarheid in 2020 in heel Vlaanderen ingevoerd kan worden. Verder plant men dat het nieuwe openbaarvervoernetwerk in gebruik genomen kan worden vanaf 1 januari 2021 (<https://www.vlaamse-ouderenraad.be/actualiteit/mobiliteit-toegankelijkheid/vlaanderen-ingedeeld-15-vervoerregios-nieuwe-decreet>).

2.3 Het standaard dial-a-ride probleem

Het standaard dial-a-ride probleem (DARP) wordt gebruikt bij het organiseren van het transport van personen met een beperkte mobiliteit, zoals ouderen en mindervaliden. Een DAR-dienst voorziet vraagafhankelijk vervoer voor hen en is een vorm van collectief vervoer. Hierbij is het mogelijk dat meerdere personen tegelijk vervoerd worden in hetzelfde voertuig. De gebruikers van de dienst definiëren de plaats waar ze opgepikt willen worden en hun eindbestemming, waarbij het mogelijk is dat ze aangeven tussen welke tijdstippen ze het liefst willen vertrekken of aankomen. Ze geven met andere woorden geen specifiek tijdstip aan, maar een tijdvenster. De aanvragen van al deze reizigers vormen de vraag voor de DAR-dienst. Om de rit zo aangenaam mogelijk te maken voor de reiziger wordt er gewerkt met een maximale reistijd, zodat er vermeden wordt dat hij een lange tijd in het voertuig zit en een grote omweg maakt die de performantie van het systeem zou kunnen verbeteren.

Een standaarddefinitie van dit DARP wordt gegeven door Cordeau en Laporte (2003). Het doel van een DARP wordt door hen als volgt gedefinieerd: het opstellen van een verzameling van routes met de laagste kosten die voldoen aan alle vraag (i.e. de verzameling van alle klant aanvragen), rekening houdend met een aantal beperkingen zoals de ritlengte en servicevereisten van de gebruikers. Kosten worden hierbij vaak proportioneel met de afstand gedefinieerd. Dit wil zeggen dat men de operationele kost van het rijden van een bepaald aantal kilometer wil minimaliseren. Daarmee is het DARP een generalisatie van het *general pick-up and delivery problem* (Parragh, Doerner, & Hartl, 2008). Hier is het de bedoeling dat een verzameling routes opgesteld worden zodat deze voldoen aan een aantal transportverzoeken. Wat het DARP onderscheidt van andere *vehicle routing* problemen (dit zijn optimalisatieproblemen waarbij men de optimale verzameling van routes

wil bepalen voor een vloot van voertuigen om zo een bepaald aantal klanten/reizigers te bereiken) is dat de vervoerskost hier wordt afgewogen ten opzichte van het gebruiksgemak. Met gebruiksgemak wordt bedoeld dat er rekening wordt gehouden met de opgegeven tijdvensters van de reizigers en dat er een maximale reistijd wordt opgelegd. DAR-diensten kunnen ofwel statisch ofwel dynamisch opereren. In het statische model zijn alle ritten op voorhand gekend, wat het mogelijk maakt om alles te plannen, terwijl in het dynamische model de ritten slechts doorheen de dag gekend zijn, zodat routes *in real time* opgesteld en aangepast worden (Cordeau en Laporte, 2003). Cordeau en Laporte (2003) halen wel aan dat een zuiver dynamisch DARP zelden voorkomt omdat er vaak toch een aantal verzoeken op voorhand gekend is. Ook is het mogelijk dat men niet meer aan alle vraag kan voldoen wanneer de verzoeken *in real time* bekend gemaakt worden.

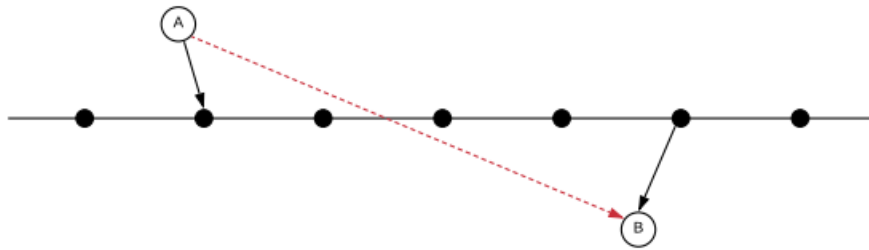
Vaak is deze standaarddefinitie echter onvoldoende om een antwoord te bieden op praktische toepassingen, aangezien deze vaak additionele beperkingen met zich meebrengen. Daarom is er al veel onderzoek gebeurd naar uitbreidingen op deze definitie en deze onderzoeken werden geclassificeerd door Molenbruch, Braekers en Caris (2017b). Een variant die nuttig is in deze context is het DARP met stochastische reistijden, dat wordt besproken door Fu (2002). Omdat er in een dynamische context nieuwe informatie kan opduiken tijdens het maken van de rittenplanning of zelfs tijdens de uitvoering hiervan, kan de betrouwbaarheid van deze rittenplanning volgens Fu (2002) verhoogd worden door gebruik te maken van stochastische en tijdsafhankelijke reistijden. Op deze manier kan er namelijk rekening gehouden worden met files en getracht worden het oplopen van vertragingen te vermijden. Twee andere varianten van het DARP die met name interessant zijn voor deze masterproef zijn het heterogeen DARP en het DARP met transfers. Een heterogeen DARP is in deze context nuttig aangezien zowel valide als mindervalide personen van de DAR-dienst gebruik kunnen maken. In een heterogeen probleem zal de vloot zowel bestaan uit voertuigen die aangepast zijn aan rolstoelen, alsook uit voertuigen die dat niet zijn (Cordeau & Laporte, 2007). Er zijn hierbij twee verschillende wijzen waarop het probleem aangepakt kan worden: in sommige probleemstellingen wordt de grootte van de vloot en de samenstelling ervan aangepast zodat aan alle vraag kan voldaan worden, terwijl bij andere het doel is het aantal verzoeken te maximaliseren die bediend kunnen worden met een vaste vloot. Heterogeniteit kan ook optreden met betrekking tot medische toestand van de gebruiker. Hanne et al. (2009, in Molenbruch et al., 2017b) en Beaudry et al. (2010, in Molenbruch et al., 2017b) beschrijven bijvoorbeeld prioriteitsbeperkingen voor het transport van patiënten tussen ziekenhuizen. De andere variant die van belang kan zijn, wordt voorgesteld in een onderzoek van Masson, Lehuédé en Péton (2014). Het gaat hier om een DARP waarbij het mogelijk is om over te stappen van het ene voertuig op het andere op zogenaamde overstaplocaties. Het DARP met transfers is in deze context interessant omdat gebruikers in het geïntegreerd DARP kunnen overstappen tussen het openbaar vervoer en DAR-voertuigen.

Een classificering van de huidige oplossingsmethoden die in de literatuur bestaan, werd gemaakt door Molenbruch et al. (2017b). Deze bestaan zowel uit exacte oplossingsmethoden, alsook uit metaheuristieken. De exacte oplossingsmethoden bestaan onder andere uit het *branch-and-cut* algoritme (Cordeau, 2006) en kolomgeneratietechnieken (Parragh, Cordeau, Doerner, & Hartl, 2012; Garaix, Artigues, Feillet, & Josselin, 2011). Vooral de laatste zijn nuttig voor het oplossen van grotere lineaire problemen, aangezien het probleem wordt opgesplitst in een masterprobleem en een

subprobleem. De idee hierachter is het feit dat veel lineaire programmeringsproblemen te groot zijn om alle variabelen expliciet te beschouwen. In de eindoplossing bevinden veel variabelen zich niet in de basis, wat wil zeggen dat ze een waarde van nul aannemen in de oplossing. Daarom stelt deze techniek dat slechts een subverzameling van variabelen beschouwd moet worden bij het oplossen. In Ingels (2012) wordt het masterprobleem beschreven als het model dat geldt voor alle voertuigen samen. Het is het originele probleem waarbij een subverzameling van variabelen wordt beschouwd. Voor elk voertuig bestaat er vervolgens een subprobleem. Dit subprobleem tracht een route te zoeken voor elk voertuig zodat de gereduceerde kost minimaal is. Een combinatie van deze twee methoden wordt gemaakt in het *branch-and-cut-and-price* algoritme van Gschwind en Irnich (2014). Een nadeel van deze exacte oplossingsmethoden is dat ze vaak traag zijn en het feit dat ze enkel probleemstellingen van een bepaalde grootte aankunnen. Vanaf het moment dat er te veel verzoeken zijn, kan een exacte oplossingsmethode geen oplossing meer geven. Vaak wordt er daarom overgeschakeld op heuristieken. Een heuristiek wordt door Foulds (1983 in Silver, 2004) gedefinieerd als een methode, vaak opgesteld op basis van ervaring, die werkt met gerichte, probleemspecifieke zoekoperatoren en die zeer waarschijnlijk tot een goede oplossing leidt voor een bepaald probleem. Het is echter niet honderd procent zeker dat deze oplossing de optimale oplossing is. Het kan namelijk zijn dat een lokaal optimum als oplossing naar voren komt. Dit wil zeggen dat men in de directe omgeving van de oplossing geen betere oplossing vindt, waardoor de oplossing lokaal optimaal is. Metaheuristieken bieden hier dan weer een antwoord op. Zij zijn namelijk in staat te ontsnappen uit een lokaal optimum en kunnen daarenboven vaak ook grotere problemen aan. Enkele metaheuristieken die vaak gebruikt worden om een DARP op te lossen zijn onder meer *tabu search* en *large neighbourhood search* (LNS). Hiernaast bestaan er ook nog hybride oplossingsmethodes die exacte mathematische programmeringsmodellen gebruiken in een metaheuristiek. Dit zijn de zogenaamde matheuristieken (Molenbruch et al., 2017b). Ze combineren de voordelen van het gebruik van een specifieke probleemstructuur en het gebruik van *solvers*.

In de meeste artikels worden DAR-diensten bestudeerd als een alleenstaand probleem. Een extra moeilijkheid ontstaat dus wanneer men openbaar vervoer integreert in het DARP en zo uitkomt bij een geïntegreerd DARP. Zo is er nog maar weinig inzicht in de effecten die deze integratie zal hebben op de algemene kostenefficiëntie en de kwaliteit van DARP. Een formulering en exacte oplossingsmethode voor een realistisch geïntegreerd DARP werd voorzien door Posada et al. (2017). Het voordeel van het integreren van openbaar vervoer in deze probleemstelling is dat het de kosten van duur direct transport naar beneden haalt. Een voorbeeld wanneer zo'n combinatie voordelig kan zijn, wordt gegeven in Figuur 4 op de volgende pagina. Wanneer er geen integratie plaatsvindt, legt het DAR-voertuig de volledige afstand af van A naar B (de rode stippellijn). In het geïntegreerde systeem haalt een DAR-voertuig de reiziger op aan knooppunt A en brengt hem naar een overstaplocatie. Een ander DAR-voertuig pikt de reiziger vervolgens op aan een andere halte van het openbaar vervoer om de reiziger vervolgens naar knooppunt B te brengen. De afstand afgelegd door de DAR-voertuigen is in het geïntegreerde systeem duidelijk korter en daardoor ook goedkoper en dus te verkiezen uit een operationeel standpunt. De reiziger boet echter wel in aan service, aangezien hij twee keer moet overstappen. Afhankelijk van het type openbaar vervoer (trein, bus ...) dat

gebruikt wordt, kan de reiziger zelfs sneller zijn, aangezien sommige DAR-voertuigen soms nog andere reizigers ophalen alvorens de reiziger op zijn eindbestemming B af te zetten.



Figuur 4. Het geïntegreerd DARP ten opzichte van het standaard DARP

2.4 Probleemformulering geïntegreerd DARP

De probleemformulering voor het geïntegreerd DARP van Posada et al. (2017) zal de basis vormen voor het empirisch gedeelte van deze masterproef. Het geïntegreerde DARP neemt het openbaar vervoer mee op in het standaard DARP, wat zoals eerder aangehaald kan zorgen voor een grotere efficiëntie. De dienstregelingen van het openbaar vervoer zullen dus mee opgenomen moeten worden in de formulering van de probleemstelling. Er ontstaat een relatie tussen het openbaar vervoer en de DAR-voertuigen doordat deze afhankelijk worden van elkaar. Het is namelijk zo dat deze twee elkaar zullen ontmoeten op een bepaalde plaats en dit liefst op een gelijk tijdstip. Hierbij is het van belang dat de DAR-diensten en het openbaar vervoer goed op elkaar afgestemd worden en er dus synchronisatie bestaat tussen de twee om zo onnodige wachttijden te voorkomen.

Posada et al. (2017) beschrijven twee formuleringen om het geïntegreerde DARP exact op te lossen. Deze verschillen in de manier waarop overstaplocaties behandeld worden. De eerste formulering bevat een groot aantal knooppunten om alle mogelijke bezoeken van een klant aan een overstaplocatie te modelleren. Een knooppunt is dus specifiek voor een bepaald ritverzoek. Er bestaat met andere woorden een knooppunt voor elk potentieel bezoek aan een bepaalde overstaplocatie. Het model dat hier kort toegelicht zal worden, bevat een andere structuur. Hier zal elk knooppunt namelijk twee indices bevatten, waarbij het eerste de fysieke locatie voorstelt en het tweede het bezoekaantal. Het knooppunt (5, 4) stelt bijvoorbeeld het vierde bezoek aan locatie 5 voor door alle voertuigen. Hierdoor kan een knooppunt meerdere malen bezocht worden, wat het aantal knooppunten doet afnemen en het model efficiënter maakt.

In bijlage 1 kan een mathematische formulering van deze probleemformulering gevonden worden. De doelfunctie bestaat uit het minimaliseren van de operationele kost van het DAR-voertuig en de gebruikskost van het openbaar vervoer. De totale afstand die de DAR-voertuigen afleggen wordt daarbij gebruikt als een benadering van de operationele kosten ervan. Met behulp van hulpvariabelen wordt er aangegeven of een bepaalde route gebruik maakt van een verbinding tussen twee knooppunten en wanneer dit het geval is, wordt de juiste kost hiervan in rekening gebracht (i.e. ofwel de kost van het DAR-voertuig, ofwel de kost van het openbaar vervoer). Aan deze functie worden vervolgens een aantal beperkingen opgelegd die onder andere betrekking hebben op het

serviceniveau van de geleverde dienst, zoals bijvoorbeeld een maximale reistijd. Er worden verder geen componenten met betrekking tot het dienstverleningsniveau toegevoegd aan de doelfunctie, aangezien er verondersteld wordt dat alle *feasible* oplossingen een aanvaardbaar niveau hebben.

Een eerste reeks beperkingen die worden opgenomen zijn typische beperkingen voor DAR-voertuigen. Beperking (2) stelt namelijk dat elk oppikknooppunt en elk afzetknooppunt bezocht moet worden door een DAR-voertuig. Beperkingen (3) en (5) houden verder rekening met het feit dat een rit van een DAR-voertuig start aan een depot en hier ook terug eindigt. Vervolgens worden er beperkingen opgenomen die betrekking hebben op de volgorde van de ritten. Beperking (4) bepaalt onder meer dat een voertuig dat bij een locatie aankomt, deze ook terug verlaat, terwijl beperkingen (6), (7) en (8) balancerende beperkingen zijn die daar eveneens voor zorgen. Beperking (9) heeft vervolgens betrekking op de beperkte capaciteit die een DAR-voertuig heeft en dat deze niet overschreden wordt. Een volgende reeks beperkingen wordt opgenomen om ervoor te zorgen dat de reistijden van de DAR-voertuigen consistent zijn (beperkingen (10) en (11)). Dit wil zeggen dat reizigers die eerder ergens opgehaald of afgezet moeten worden, ook eerder bediend worden (i.e. de servicetijd van een knooppunt dat later in de route wordt bediend moet groter zijn dan de servicetijd van het voorgaande knooppunt en deze tijd moet ook minstens zo groot zijn als alle reistijden opgeteld om dit knooppunt te bereiken). Deze consistentie moet er ook zijn voor de dienstitijden bij de overstapknooppunten (beperking (16)). In de probleemformulering van Posada et al. (2017) is het mogelijk dat een aankomst- of een vertrekplaats van een klant kan samenvallen met een bushalte van het openbaar vervoer. Dit betekent dat er in dat geval geen DAR-voertuigen ingezet moeten worden om het eerste of laatste gedeelte van een rit van een bepaalde rit af te leggen. Het feit dat dit mogelijk is hier, moet mee opgenomen worden (beperkingen (12) en (13)). Daarnaast worden er ook beperkingen opgenomen die zorgen voor synchronisatie tussen de dienstregeling van het openbaar vervoer en de ritten van de DAR-voertuigen (beperkingen (14) en (15)). Wanneer een reiziger een verzoek plaatst voor een rit, heeft hij de mogelijkheid om een tijdvenster op te geven voor de tijdstippen waarbinnen hij opgehaald of afgezet wil worden. Er moeten daarom dan ook beperkingen opgenomen worden die rekening houden met deze opgegeven tijdvensters (beperking (17)). Om een zo goed mogelijke service te kunnen bieden aan de reiziger, wordt er ook een maximale reistijd vooropgesteld. Beperking (18) wordt daarom opgenomen. Deze zorgt er namelijk voor dat deze tijd niet overschreden wordt. Een andere groep beperkingen (19 t.e.m. 21) wordt nog opgenomen om een variabele te definiëren die ervoor zorgt dat de overstapknooppunten in de juiste volgorde bezocht worden. Als laatste worden ook de standaardbeperkingen van een lineair programmeringsprobleem opgenomen (beperkingen (22) t.e.m. (28)).

2.5 Synchronisatie

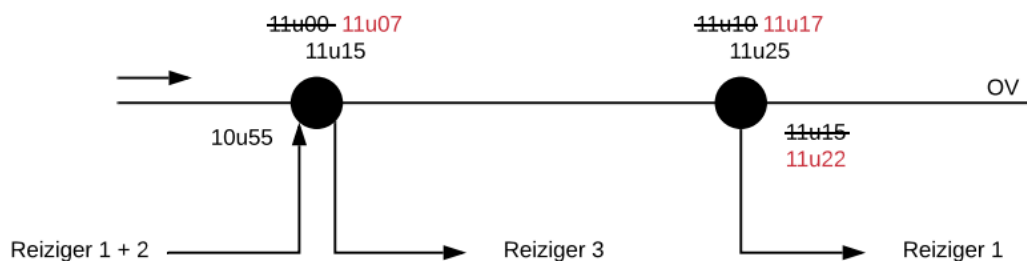
Synchronisatie wil zeggen dat wanneer er een combinatie gemaakt wordt tussen openbaar vervoer en dial-a-ride diensten, deze ook op elkaar afgestemd worden. Drexl (2012) heeft een classificatie gemaakt van de verschillende types van synchronisatie bij *vehicle routing problems* (dit zijn optimalisatieproblemen waarbij men de optimale verzameling van routes wil bepalen voor een vloot van voertuigen om zo een bepaald aantal klanten/reizigers te bereiken), omdat er tot dan toe in de literatuur geen eenduidige benaming voor bestond.

Drexl (2012) beschrijft het probleem dat zich kan voordoen wanneer er geen synchronisatie is. Het door hem beschreven *interdependence problem* stelt dat een verandering in een bepaalde route bij *vehicle routing problems with multiple constraints* een invloed heeft op de andere routes in de oplossing. Deze verandering kan deze andere routes zelfs *infeasible* kan maken. Voertuigen opereren met andere woorden niet onafhankelijk van elkaar. Afhankelijk van de probleemstelling vereist dit een andere vorm van synchronisatie. Drexl (2012) stelt in zijn paper vijf soorten synchronisatie voor. Het type synchronisatie dat van toepassing is op het geïntegreerde DARP is operationele synchronisatie. Een operatie wordt hierbij gedefinieerd als een rit die uitgevoerd wordt door een voertuig via een bepaalde route en die zo de uitvoering van één of meerdere daaropvolgende taken mogelijk kan maken. Er wordt bij operationele synchronisatie dus zowel rekening gehouden met de ruimtelijke als met de tijdscoördinatie van de taken uitgevoerd door verschillende voertuigen op een bepaalde locatie. Men beslist als het ware over de tijd en de locatie van een bepaalde interactie tussen voertuigen. Bij dit soort synchronisatie worden vereisten opgesteld die ervoor zorgen dat compatibele voertuigen gekozen worden om de opdrachten uit te voeren en dat deze op hetzelfde tijdstip uitgevoerd worden of met voorrang binnen een gegeven tijdsinterval. Het opstellen van een planning voor een bepaald voertuig zonder daarbij rekening te houden met de schema's van andere voertuigen is bijgevolg onmogelijk.

2.6 Oorzaken van vertragingen bij het openbaar vervoer

Vervolgens wordt er gekeken naar de oorzaken van vertragingen bij het openbaar vervoer. Deze oorzaken zijn namelijk van belang, omdat dit, afhankelijk van de oorzaak van de vertraging, andere gevolgen heeft voor de integratie van het openbaar vervoer en DAR-diensten. Het is van belang te kijken naar vertragingen aangezien deze voor problemen kunnen zorgen in de opgemaakte rittenplanning omdat aansluitingen hierdoor bijvoorbeeld niet gehaald worden. Als een rit van een bepaald DAR-voertuig eruit bestaat dat deze eerst een persoon moet ophalen aan een bushalte en daarna zijn rit verderzet om een andere persoon af te zetten aan een andere bushalte, zorgt een vertraging van de bus van de eerste reiziger er misschien voor dat de bus die de tweede reiziger neemt, al vertrokken is en dat deze dus moet wachten op een volgende bus, wat zijn reistijd doet toenemen. Dit verstoort vervolgens het schema van een volgend DAR-voertuig dat deze reiziger aan de bushalte afhaalt. Het is dus belangrijk dat vertragingen bij het openbaar vervoer, maar ook bij de DAR-voertuigen zelf, geïntegreerd worden in het algoritme. Opdat deze vertragingen kunnen toegevoegd worden aan het algoritme, is het van belang de oorzaken van vertragingen te achterhalen.

Een voorbeeld van de impact die vertragingen kunnen hebben op de rittenplanning wordt weergegeven in Figuur 5. Hier zien we dat de route van reizigers 1 en 2 een transport met het openbaar vervoer inhoudt, alsook deze van reiziger 3. Zij nemen volgens de vooropgestelde rittenplanning het openbaar vervoer om 11u00. Het DAR-voertuig zet hen dan ook af aan de halte om 10u55. De bus heeft echter te kampen met een vertraging van zeven minuten, waardoor deze pas aan de halte aankomt om 11u07. Dit zorgt er voor dat reiziger 1 te laat aankomt aan de halte waar hij moet afstappen en waar een DAR-voertuig op hem wacht. Dit busje zet zijn rit dan pas verder om 11u22 in plaats van de vooropgestelde 11u15. Dit veroorzaakt vervolgens een vertraging voor de verdere rit van dit DAR-voertuig en alle reizigers die het vervoert. Ditzelfde probleem geldt eveneens voor reiziger 3, die door de vertraging ook later aankomt. Ook de rit van dit DAR-voertuig zal verder rijden met de al opgelopen vertraging, waardoor er mogelijk ook problemen ontstaan voor de andere reizigers op deze rit en voor de tijdsbeperkingen van reiziger 3 zelf. De veroorzaakte vertragingen in de ritten van de DAR-voertuigen hebben dus een effect op de verdere rit. Hierdoor kunnen bijvoorbeeld verdere aansluitingen met het openbaar vervoer gemist worden, wat de vertragingen in het gehele systeem nog meer doet toenemen. Zo ontstaat er een kettingreactie. Een vertraging in de rittenplanning heeft dus een invloed op de rittenplanningen van alle andere voertuigen, wat het effect van de eerste vertraging versterkt. Daarom is het beter om proactief in te grijpen door vertragingen in *real time* te integreren in de rittenplanning. Zo niet, kan de planning onhaalbaar worden, door het feit dat bijvoorbeeld tijdvensters of de maximale ritduur geschonden worden.



Figuur 5. Impact vertragingen op rittenplanning

Uit het onderzoek '*Passenger Focus*' (Hunt, 2013) blijkt dat de factoren die leiden tot vertragingen opgedeeld kunnen worden in twee groepen, namelijk geanticipeerde ontwrichting en onverwachte ontwrichting. In de eerste categorie vallen wijzigingen in de routes van het openbaar vervoer door omleidingen ten gevolge van wegenwerken of lokale evenementen. In de andere categorie vallen vertragingen omwille van slecht weer, congestie, het wachten aan verkeerslichten, storingen of technische problemen en ongevallen. Ook uit een onderzoek van Nagy en Csiszár (2015) bleek dat de belangrijkste oorzaken van vertragingen technische storingen, problemen met infrastructuur, problemen met het personeel of buitengewone omstandigheden waren. De irritatie bij vertragingen blijkt uit deze onderzoeken ook afhankelijk te zijn van het risico op de vertraging en de duur van de vertraging.

Uit bevestigingen bij reizigers bleek dat de grootste vertragingen plaatsvonden door congestie op piekmomenten en bij geplande wegenwerken (Hunt, 2013). Andere redenen die door de respondenten van deze studie aangehaald werden zijn onder meer dat bussen soms te vroeg vertrekken en dus voorlopen op schema of dat ze niet alle wachtende reizigers meenemen bij bijvoorbeeld een drukke bushalte, omdat de chauffeur niet alle wachtende reizigers had opgemerkt of niet stopte bij een bepaalde halte. Dit laatste was zeker het geval voor rolstoelgebruikers. Ook het opstappen van andere reizigers kan een reden voor vertraging vormen, aangezien het mogelijk is om op de bus zelf nog te betalen voor de rit. Hoe meer reizigers er opstappen, hoe hoger de vertraging kan oplopen.

Een identificatie van deze oorzaken kan volgens Nagy en Csiszár (2015) helpen bij de toekomstige planning van de openbaarvervoerdiensten en afhankelijk van de voorspelde verkeersdrukten kunnen de reisschema's aangepast worden. Ook wordt geopperd dat door bijvoorbeeld betere investeringen te doen in infrastructuur technische storingen/incidenten vermeden kunnen worden en zo de afwijkingen van de geplande vertrek- en aankomsttijden geminimaliseerd worden.

2.7 Hoe worden deze vertragingen opgenomen in de huidige literatuur?

Gershenson en Pineda (2009) stellen dat reizigers die aankomen bij haltes het best bediend worden wanneer de tijdsintervallen tussen aankomende voertuigen (i.e. *headway*) gelijk zijn. De voertuigen passeren met andere woorden op regelmatige tijdstippen aan de halte om zo de wachttijden te minimaliseren. Wanneer een voertuig echter vertraging oploopt, wordt deze cyclus doorbroken en zal er een kortere *headway* ontstaan met het volgende voertuig, terwijl die met het voorgaande voertuig net langer wordt. Deze langere *headways* leiden tot meer wachtende reizigers, waardoor meer mensen op het volgende voertuig zullen opstappen, wat, zoals ook naar voren kwam in het onderzoek van Hunt (2013) hierboven, weer voor een extra vertraging kan zorgen. Om om te gaan met deze ongelijkheid werden al verscheidene strategieën gevolgd om zo de vertragingen tot een minimum te beperken, zoals bijvoorbeeld het niet stoppen aan bepaalde haltes. Zo'n soort strategie lijkt echter eerder onrealistisch voor dit onderzoek. Het bereiken van *equal headway* stabiliteit hangt volgens de auteurs niet enkel van de methode af waarmee het openbaar vervoer gereguleerd wordt, maar ook van het gedrag van de reizigers.

Uit een onderzoek van Carosi, Gualandi, Malucelli en Tresoldi (2015) blijkt verder dat vertragingen die eigen zijn aan het openbaarvervoersysteem zeker in een stedelijke setting zorgen voor een negatief beeld van het openbaar vervoer. Ze verhogen eveneens de operationele kost doordat bijvoorbeeld extra chauffeurs en/of middelen ingezet moeten worden. Manieren om met deze verstoringen om te gaan werden initieel geïntroduceerd in de luchtvaart (Clausen et al., 2010 in Carosi et al., 2015)). De laatste jaren werd dit probleem ook bekeken voor lokale openbaarvervoerdiensten. Volgens Carosi et al. (2015) bevindt de grootste uitdaging bij het managen van storingen zich vooral in de regelmaat van de dienst en het in staat zijn verschillende soorten gebeurtenissen van elkaar te kunnen onderscheiden. Het onderscheid moet hierbij gemaakt worden tussen gebeurtenissen die een negatieve impact hebben op de dienstregeling en deze wiens effect een minimale invloed uitoefenen en waarvan er binnen een aanzienlijke tijd hersteld kan worden. In het artikel werken zij een methode uit om te bepalen of er actie ondernomen moet worden

in een bepaalde situatie of dat deze zich vanzelf zal oplossen. Een mogelijke actie kan bijvoorbeeld het inzetten van een extra bus met een extra chauffeur zijn. Li et al. (2009 in Carosi et al., 2015) kijken vervolgens naar de aanpassingen in de schema's die nodig zijn wanneer een voertuig in panne valt en andere voertuigen moeten omrijden om te zorgen voor de reizigers op dat voertuig. Uit datzelfde onderzoek blijkt dat zo'n soort oplossingen vooral nuttig zijn in rurale gebieden met een lagere frequentie dan in stedelijk gebied waar de frequentie hoger ligt.

Daarnaast blijkt uit een onderzoek van Litman (2017) van het *Victoria Transport Policy Institute* dat ritten met het openbaar vervoer vaak langer duren dan wanneer men reist met de auto. Dit is het gevolg van wachttijden aan haltes en de additionele stops die gemaakt worden bij het openbaar vervoer. Deze langere reistijd neemt daarenboven nog eens toe wanneer er congestie is en er daardoor onverwachte vertragingen plaatsvinden. In de cursus Verkeerskunde Basis aan de KU Leuven stelt men dat het pad tussen het start- en eindpunt zo direct mogelijk zou moeten zijn (Immers & Corman, 2011). Zij stellen dat de routes van het openbaar vervoer niet meer dan twintig of dertig procent langer mogen zijn dan wanneer de route wordt afgelegd met een auto. In een onderzoek van De Ceuster et al. (2010) wordt een acceptabele omrijfactor beschreven als 1,4 op het nationale niveau en 1,7 op het regionale niveau door een Nederlandse studie. Deze factor is de kortste afstand binnen een netwerk gedeeld door de afstand in vogelvlucht. Maar deze factor moet toch met zorg geïnterpreteerd worden. Het geldende principe is dat hoe groter de afstand tussen twee punten, hoe kleiner de omwegfactor moet zijn. In realiteit kan het echter zijn dat reizigers een hogere omweg accepteren als dit hen bevoordeelt op een andere manier. Litman (2017) schrijft verder dat de eenheidskosten van het reizen ook sterk afhankelijk zijn van de voorkeuren en behoeften van de reizigers en de omstandigheden waaronder men reist. Een minuut die gespendeerd wordt in de file, tijdens het wachten op een bus of tijdens het staan in een overvolle bus kost veel meer dan een minuut gespendeerd in aangename omstandigheden, zoals bijvoorbeeld het zitten in een bus die op tijd is en waar men voldoende plaats heeft. Studies die reistijden waarderen geven aan dat een oncomfortabele reis twee tot vier keer zo duur is als een aangename reis (Litman, 2009 in Litman, 2017).

Een andere manier om om te gaan met vertragingen bij het openbaar vervoer, wordt teruggevonden in het *delay management problem* (DMP). Hierbij stelt men zich de vraag of het bij vertragingen beter is voor een DAR-voertuig of een ander vervoermiddel om te wachten of om dit niet te doen en gewoon op tijd te vertrekken. Verschillende manieren werden al geïntroduceerd en geanalyseerd als oplossing voor dit probleem. Ginkel en Schöbel (2007) presenteren een *bicriteria model* voor het probleem. Hierbij houden ze rekening met zowel de vertraging van de voertuigen als met het aantal reizigers dat een aansluiting mist. Veel vertragingen kunnen vermeden worden door het opstellen van vertragingresistente dienstregelingen (Liebchen en Stiller, 2006 in Ginkel en Schöbel, 2007). Wanneer er dan toch vertragingen optreden, tracht men vaak het ongemak hiervan te minimaliseren. Het kan namelijk gebeuren dat wanneer een reiziger een aansluiting mist, zijn vertraging groter wordt, omdat hij een latere bus moet nemen om zijn bestemming te bereiken. De wachttijd voor deze reizigers kan dan serieus oplopen. Er zijn daarom bij de oplossing van het DMP volgens Ginkel en Schöbel (2007) twee conflicterende doelen. Enerzijds, als iedereen wacht, zullen er geen aansluitingen gemist worden, maar zal de som van de vertragingen over alle voertuigen zeer groot

zijn. De vertraging zal zich als het ware verspreiden over het gehele netwerk en het aantal reizigers dat er een effect van ondervindt zal groot zijn. Anderzijds, als alle voertuigen zo stipt mogelijk vertrekken, wordt het aantal voertuigen met vertragingen geminimaliseerd, maar zullen er meer aansluitingen gemist worden. Het aantal reizigers dat er een effect van ondervindt zal dan kleiner zijn. Degenen die wel moeten wachten, zullen hun wachttijd echter wel sterk zien toenemen. In de literatuur werden hiervoor twee benaderingen onderzocht. Een eerste wil het gewogen gemiddelde van deze beide functies minimaliseren door middel van een enumeratieprocedure en een *greedy* heuristiek binnen een max-plus algebraïsch model. Een tweede benadering tracht de gemiddelde vertraging van de passagiers te minimaliseren. Dit werkt op basis van lineaire integrale programmeringsproblemen, die opgelost worden met een *branch-and-bound* methode. Een nadeel van deze methodes is dat ze zeer gedetailleerde info van reizigers vragen. Het DMP bestaat er dus uit het wacht- en vertrekbeleid te definiëren dat de totale vertraging op het netwerk minimaliseert. Het gaat met andere woorden bepalen hoe andere voertuigen in het netwerk zouden moeten reageren om de som van de vertragingen te minimaliseren. In een onderzoek van Heilporn, De Giovanni en Labbé (2008) werden hiervoor twee equivalente *mixed integer linear programming models* voorgesteld met een initiële vertraging. Deze worden opgelost door middel van een *branch-and-cut procedure* en door een *constraint generation approach*. In datzelfde onderzoek komt naar voren dat vanuit het standpunt van de reiziger, de meeste verbindingen behouden moeten blijven zonder te wachten, omdat dit leidt tot de kleinste vertragingen voor de reizigers. Het verhoogt volgens hen eveneens de aantrekkelijkheid van openbaarvervoernetwerken (Heilporn et al., 2008).

Het is natuurlijk beter om vertragingen te voorkomen dan erop te reageren. In de praktijk is het echter onmogelijk om vertragingen volledig te voorkomen, net zoals het onvermijdelijk is dat deze vertragingen dan de routes van andere voertuigen niet beïnvloeden. Daarom ligt de focus ook op hoe we het best kunnen omgaan met vertragingen.

Een methode die in de literatuur hiervoor wordt aangehaald, is het robuust maken van de dienstregelingen tegenover vertragingen. Hiermee bedoelt men het opstellen van een dienstregeling zodat deze een gegeven hoeveelheid vertraging kan verdragen. Verschillende manieren om dit te verwezenlijken worden weergegeven in Schachtebeck (2009). Een andere methode die wordt aangehaald in dat onderzoek is in plaats van te zoeken naar een robuuste dienstregeling, te focussen op hoe te reageren in geval van vertragingen. Een opsomming van oplossingsmethoden voor verschillende soorten van dit probleem wordt eveneens weergegeven in Schachtebeck (2009). De aangehaalde oplossingsmethoden in de literatuur kunnen handig zijn bij het opnemen van de vertragingen in het empirisch gedeelte.

3. Empirisch gedeelte

3.1 Aanpak empirisch gedeelte

In het empirisch gedeelte zal de impact van vertragingen bij het openbaar vervoer op de operationele kosten van de DAR-aanbieder nagegaan worden. Zo kan gecontroleerd worden of deze een impact uitoefenen op de rittenplanning van de DAR-voertuigen. De operationele kosten wanneer er vertragingen zijn en deze wanneer er geen vertragingen zijn, zullen vergeleken worden. Zo wordt er bijvoorbeeld nagegaan of DAR-voertuigen meer ingezet zullen worden wanneer er vertragingen mogelijk zijn. Want wanneer deze DAR-voertuigen meer bevroegd zijn, zal er namelijk minder flexibiliteit zijn in de rittenplanningen, wat leidt tot hogere kosten.

Om de impact van vertragingen na te gaan zal gebruik gemaakt worden van verschillende datafiles, die beschreven zullen worden in sectie 3.2. Sectie 3.3 zal vervolgens een *large neighbourhood search*-algoritme bespreken, dat aangewend zal worden om te komen tot de resultaten. Deze zullen aansluitend besproken worden in sectie 3.4. In deze sectie zal eerst een globaal scenario uitgewerkt worden, waarna er gekeken zal worden naar de impact van vertragingen op verschillende criteria die betrekking hebben op de efficiëntie, gebruiksgemak ...

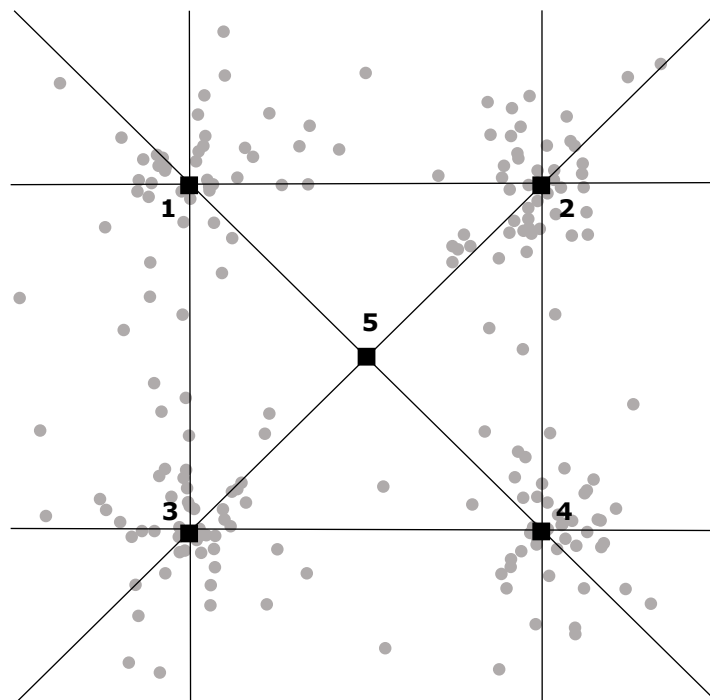
In het empirisch gedeelte zal er expliciet naar vertragingen bij het openbaar vervoer gekeken worden en niet naar vertragingen bij DAR-voertuigen. Hoewel deze twee vervoersvormen allebei gebruik maken van dezelfde infrastructuur (i.e. dezelfde wegen) en dus op dezelfde punten te kampen zullen hebben met congestie, werd deze beslissing gemaakt omdat men bij basisbereikbaarheid het openbaar vervoer vooral in stedelijke gebieden en op drukke interstedelijke assen wil behouden en afschaffen in de meer rurale gebieden. In deze gebieden zal er dan gebruik gemaakt worden van vervoer op maat, door onder andere DAR-voertuigen. Vermits de kans op congestie kleiner is in rurale gebieden, ligt de focus dan ook op vertragingen bij het openbaar vervoer en hun impact op de operationele werking van de DAR-diensten.

3.2 Datafiles

Voor het empirisch gedeelte van deze masterproef werd gebruikt gemaakt van twee verschillende soorten datafiles. Enerzijds werd er gewerkt met datafiles die een dienstregeling van het openbaar vervoer weergeven. Andere datafiles beschrijven de verschillende klantaanvragen. De gegenereerde klantlocaties bevinden zich allemaal in een gebied met dimensies $[-20,20]^2$. Dit gebied bevat vier dichtbevolkte steden, die zich bevinden op de coördinaten $(-10,-10)$, $(-10,10)$, $(10,-10)$ en $(10,10)$, waarrond de klantlocaties geclusterd zijn. In elke stad bevindt zich eveneens een depot voor de DAR-voertuigen, waar de voertuigen 's ochtends vertrekken en waar ze 's avonds ook terug dienen aan te komen. In elk depot bevinden zich vijf DAR-voertuigen, die elk een beperkte capaciteit hebben. In elk voertuig is er plaats voor drie ambulante gebruikers en voor drie rolstoelgebruikers. De data wordt gegenereerd over een tijdsperiode van 720 minuten, aangezien dit de maximumduur is die de voertuigen onderweg mogen zijn. Deze tijdsperiode situeert zich van 6.30 uur 's ochtends tot 18.30 uur 's avonds, waarbij er uitgegaan wordt van twee piekperiodes van telkens drie uur. Deze periodes

zijn van 6.30 uur tot 9.30 uur en van 15.30 uur tot 18.30 uur. Deze periodes zijn gebaseerd op realistische settings bij Vlaamse aanbieders.

Het gebruikte openbaarvervoernetwerk, weergegeven in Figuur 6 samen met de geclusterde klantlocaties, bestaat uit vijf haltes, die verbonden worden door verschillende buslijnen. Meer bepaald zal er gekeken worden naar verbindingen tussen haltes 1-2, 1-3, 2-4, 3-4, 1-5-4 en 2-5-3. Er wordt gewerkt met verschillende scenario's voor de dienstregelingen. Deze dienstregelingen volgen een cyclisch patroon, wat ervoor zorgt dat ze een gelijke *headway* hebben. Een *headway* is een maatstaf van de afstand of de tijd tussen voertuigen in een vervoersysteem. In het eerste scenario zullen er twee bussen per uur rijden in de spitsperiode en één bus per uur in de dalperiode. In het tweede scenario zal er in de spits op elke lijn elk kwartier een bus passeren aan een halte. In de dalperiode zal dit elk halfuur gebeuren. In een derde en laatste scenario zal de bus nog frequenter rijden, namelijk elke 7,5 minuut in de spits en elk kwartier in de dalperiode. Er werd geopteerd voor deze scenario's omdat er zo geanalyseerd kan worden of de frequentie van het stoppen van de bus een invloed heeft op het combineren van het openbaar vervoer en de DAR-voertuigen. Er kan zo een vergelijking gemaakt worden tussen dunbevolkte gebieden waar het openbaar vervoer minder rijdt en dichtbevolkte gebieden met een frequentere dienstregeling.



Figuur 6. Weergave openbaarvervoernetwerk en geclusterde klantlocaties

De snelheid die hierbij wordt verondersteld voor het openbaar vervoer is 60 km/u. Deze snelheid is dezelfde als de snelheid van de DAR-voertuigen. Dezelfde snelheid werd verondersteld voor beide vervoersmodi omdat de afstand tussen twee verschillende haltes tamelijk groot is. Deze bedraagt namelijk ofwel 14,14 km (tussen haltes 1 en 5) ofwel 20 km (tussen haltes 1 en 2). De bus zal daarom gebruik kunnen maken van dezelfde wegen als de DAR-voertuigen en zal daarom aan

dezelfde snelheid kunnen rijden. Er wordt dus met andere woorden geen tijdverlies verondersteld door frequente haltes, maar ook geen tijdwinst door het gebruik van vrije busbanen of rail.

De andere datafile heeft betrekking op de klantaanvragen. Hiervoor werd er eveneens gewerkt met verschillende scenario's. De verschillende scenario's hebben betrekking op het aantal reizigers dat in de spits pendelt. Hiermee wordt het aantal mensen bedoeld dat vervoer nodig heeft naar een bepaalde locatie tijdens de ochtendspits en de rit huiswaarts vervolgens maakt in de avondspits. Dit aantal bedraagt voor de vier verschillende scenario's respectievelijk 50%, 58,33%, 66,67% en 75%. De andere klanten behouden een willekeurig tijdvenster. Dit houdt in dat ze niet per se in de spits vertrekken en terugkeren, maar dat het tijdvenster waarbinnen ze op een locatie willen aankomen willekeurig bepaald wordt. Het tijdvenster dat wordt opgesteld, strekt zich uit over vijftien minuten. Dit tijdvenster geldt voor de aankomsttijd bij de heenrit en voor de vertrektijd bij de terugrit en hiermee wordt een interval bedoeld waartussen de reiziger op zijn aankomstplaats moet aankomen of waartussen hij op zijn vertrekplaats moet vertrekken. Om de tijd te bepalen die een klant vervolgens verblijft op een bepaalde locatie, wordt er gebruik gemaakt van een normale verdeling. Op basis van deze duur wordt dan een tijdvenster opgesteld voor de vertrektijd van de terugrit. Dit is een beperking die opgelegd zal worden en waaraan voldaan moet worden door de rittenplanning. Elke datafile bevat 200 klantaanvragen. Deze 200 aanvragen betekenen 100 ritten heen en 100 terug.

Een andere assumptie die gemaakt wordt, is het feit dat 75% van de reizigers zich verplaatst tussen de verschillende *clustering poles*, terwijl 25% een verplaatsing maakt binnen zijn *clustering pole*. Dit is een belangrijk gegeven aangezien dit een invloed heeft op het feit of het openbaar vervoer gebruikt zal worden bij een bepaalde verplaatsing. Rolstoelgebruikers zullen overigens altijd rechtstreeks vervoerd worden.

Daarnaast wordt er gewerkt met een beperking die oplegt hoe lang een persoon onderweg mag zijn. Dit wordt ook wel de maximale reistijdfactor genoemd. De impact van deze factor zal eveneens onderzocht worden. In de verschillende scenario's zal de maximale reistijdfactor variëren tussen 1,25 en 2. De factor wordt gelijkgesteld aan één om de tijd voor te stellen die men nodig heeft om de afstand van punt A naar punt B direct af te leggen met een DAR-voertuig, in vogelvlucht. In de verschillende scenario's zal er dus gewerkt worden met verschillende factoren voor de maximale tijd die een persoon onderweg mag zijn bij het afleggen van een bepaalde afstand ten opzichte van de tijd die men nodig heeft om deze afstand direct af te leggen.

Er zal dus bij de analyse van de resultaten gewerkt worden met verschillende scenario's. Eentje zal zijn op basis van hoe frequent het openbaar vervoer rijdt, zoals gedefinieerd in de datafile. Een tweede zal gebaseerd zijn op het aantal spitsreizigers en een derde op de maximale reistijdfactor. Daarnaast zal er binnen elk scenario ook een vergelijking gemaakt worden op basis van de verschillende groottes van de kans op vertragingen die mogelijk zijn. Een overzicht van de verschillende scenario's wordt weergegeven in Tabel 1.

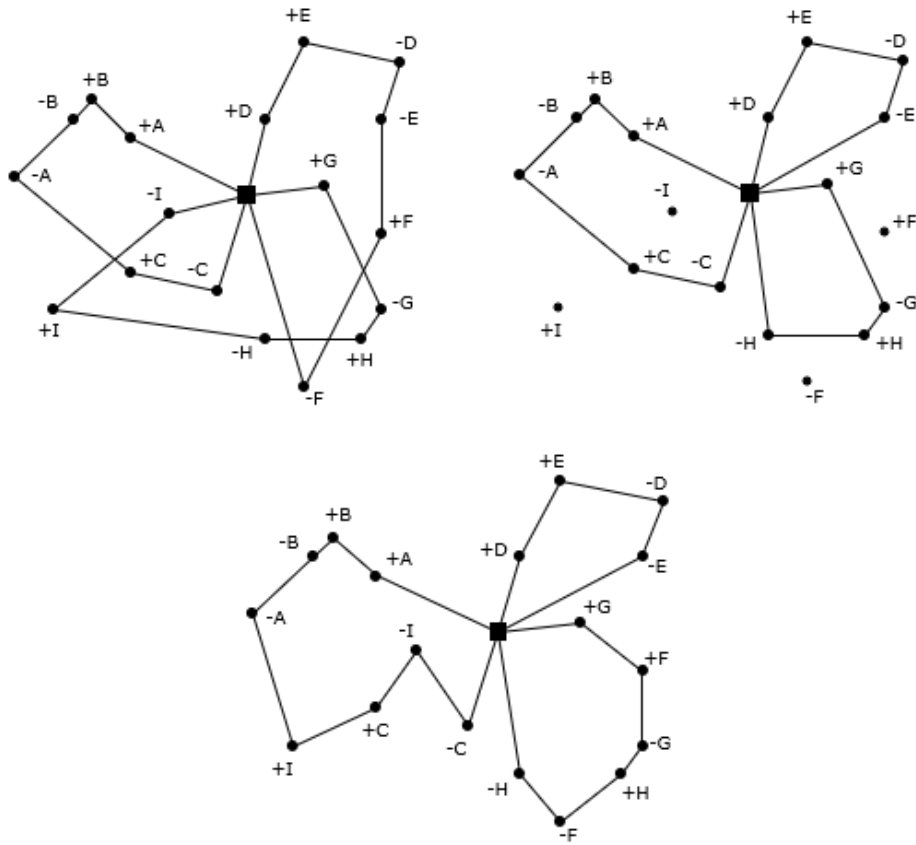
Tabel 1. Overzicht van de verschillende scenario's

Scenario 1: op basis van de frequentie van het openbaar vervoer
Scenario 1a: geen OV
Scenario 1b: 1/u dal – 2/u piek
Scenario 1c: 2/u dal – 4/u piek
Scenario 1d: 4/u dal – 8/u piek
Scenario 2: op basis van het aantal spitsreizigers
Scenario 2a: 50% spitsreizigers
Scenario 2b: 58% spitsreizigers
Scenario 2c: 67% spitsreizigers
Scenario 2d: 75% spitsreizigers
Scenario 3: op basis van de maximale reistijdfactor (MRT)
Scenario 3a: MRT = 1,25
Scenario 3b: MRT = 1,5
Scenario 3c: MRT = 1,75
Scenario 3d: MRT = 2
Scenario's op basis van de kans op vertragingen (geïntegreerd in elk van de voorgaande scenario's)
Scenario i: geen vertragingen
Scenario ii: vertragingen 15% dal – 30% piek
Scenario iii: vertragingen 20% dal – 40% piek
Scenario iv: vertragingen 25% dal – 50% piek
Scenario v: gemiddelde over alle mogelijke vertragingen heen

3.3 Large neighbourhood search

Het algoritme dat gebruikt zal worden in deze masterproef is gebaseerd op een implementatie van een *large neighbourhood search*-algoritme, uitgebreid met een extra periodieke diversificatiefase, zoals beschreven in Molenbruch, Braekers en Caris (2017a). *Large neighbourhood search* (LNS) is een metaheuristiek voorgesteld door Shaw (1998, in Pisinger en Røpke, 2010). Metaheuristieken zijn, zoals eerder aangehaald, oplossingsmethoden die het mogelijk maken te ontsnappen uit lokale optima, waardoor er een check van de *feasible* regio kan uitgevoerd worden. Bij deze metaheuristiek wordt een initiële oplossing (i.e. verschillende routes die knooppunten (zoals het depot, haltes van het openbaar vervoer, oppikpunten en afzetpunten) bezoeken om klanten te vervoeren) gradueel verbeterd door de oplossing eerst deels te verbreken en daarna te herstellen.

Figuur 7 illustreert schematisch hoe een LNS-algoritme werkt.



Figuur 7. Schematische voorstelling van het LNS-algoritme

In het voorbeeld in Figuur 7 vraagt een aantal personen (voorgesteld door een letter in de figuur, gaande van A tot en met I) een rit aan. Hierbij worden zij opgehaald (+) en afgezet (-) op hun bestemming door voertuigen die hun route elk starten aan het depot (voorgesteld door het vierkant). De afbeelding linksboven geeft de initiële oplossing weer, die bestaat uit de routes van drie verschillende voertuigen. Deze oplossing is *feasible*, aangezien alle klanten opgehaald en terug afgezet worden door de voertuigen. Hierbij wordt de veronderstelling gemaakt dat de tijdsbeperkingen en de capaciteitsbeperkingen gerespecteerd zijn. De oplossing is echter niet optimaal, aangezien sommige voertuigen een best grote route afleggen. Het LNS-algoritme gaat deze oplossing trachten te verbeteren door een aantal knooppunten uit de oplossing te verwijderen met behulp van een *destroy operator*, waardoor de oplossing niet meer volledig is. Deze oplossing wordt weergegeven in de afbeelding rechtsboven. Reizigers F en I worden bij deze oplossing echter niet bediend. Daarom worden zij vervolgens één voor één terug toegevoegd met behulp van een *repair operator*. Deze oplossing wordt weergegeven onderaan in Figuur 7. Deze oplossing is *feasible*, aangezien alle reizigers op hun bestemming raken. Het is eveneens een efficiëntere oplossing, aangezien de afstand die de verschillende voertuigen moeten afleggen, korter is geworden in de eindoplossing en de routes elkaar niet meer kruisen. Dit is de procedure die doorlopen wordt bij het uitvoeren van een LNS-algoritme en vaak wordt de procedure meerdere keren herhaald totdat een beste oplossing gevonden wordt.

Bij elke iteratie wordt er dus een *destroy operator* gekozen. Hiervoor zijn verschillende operatoren mogelijk. In het onderzoek van Molenbruch et al. (2017a) wordt er afgewisseld tussen vier verschillende operatoren. Eén ervan is een *random removal* operator. Deze verwijdert willekeurig verzoeken uit de oplossing, elk met een gelijke kans. Een ander voorbeeld is een *worst removal* operator. Deze houdt bij het verwijderen rekening met het aantal kilometer dat wegvalt om zo de meest belastende linken (deze met de grootste kost) het eerst te kunnen verwijderen. Een derde is de *related removal* operator. Deze verwijdert verzoeken uit de oplossing gebaseerd op overeenkomsten tussen verzoeken. Hierbij start de operator met het selecteren van een willekeurig verzoek, waarna er verzoeken verwijderd worden die inwisselbaar zijn met het eerst geselecteerde verzoek. Een laatste is de *proximity removal* operator, die verzoeken willekeurig verwijdert in gebieden waar verschillende routes overlappen (in tijd en ruimte). Het verschil met de vorige operator zit hier in het feit dat de geselecteerde verzoeken niet per se allemaal gerelateerd moeten zijn, maar dat ze elk individueel gerelateerd moeten zijn aan een verzoek dat bediend wordt in een andere route. De gekozen *destroy operator* wordt vervolgens uitgevoerd totdat een willekeurig percentage van verzoeken, gesitueerd in het interval van 0,01 tot een gekozen maximumwaarde, verwijderd is uit de huidige oplossing. Door het feit dat een aantal verzoeken uit de oplossing verwijderd wordt, zijn de routes op dat moment korter en is de oplossing onvolledig. Daarom wordt er vervolgens een *repair operator* gekozen, zodat de oplossing terug gradueel wordt vervolledigd. Hierbij bestaan er weer een aantal mogelijke operatoren waaruit gekozen kan worden, zoals bijvoorbeeld een *random insertion order* operator. Deze voert de beste toevoeging van een willekeurig geselecteerd verzoek uit, waarbij alle mogelijke toevoegingen in een route bekeken worden. De kans dat een verzoek hierbij gekozen wordt, is gelijk. Een ander voorbeeld is een *greedy insertion* operator. Deze voert de beste toevoeging over alle verzoeken uit. In Figuur 7 wordt er gebruik gemaakt van een *greedy* heuristiek. Dit wil zeggen dat alle vrije knooppunten nagegaan worden en dat vervolgens het knooppunt toegevoegd wordt waarvoor de kost om het aan een route toe te voegen het kleinst is. Dit wordt zo eerst gedaan voor reiziger F en vervolgens voor reiziger I (i.e. tot alle knooppunten terug deel uitmaken van de oplossing). Een derde en laatste operator die bestaat, is de *2-regret insertion* operator. Deze voegt het verzoek met de grootste *regret value* over alle toevoegingsmogelijkheden toe. Deze *regret value* is het verschil tussen de kost van het toevoegen aan een route op de tweede beste plaats en de kost van het toevoegen op de beste plaats. Bij deze strategie worden de verzoeken met de grootste *regret value* eerst toegevoegd omdat zij de grootste impact kunnen hebben op de uiteindelijke kwaliteit van de oplossing. De positie van de tweede beste bevindt zich in een andere route dan de beste, zodat ze niet gelijktijdig verwijderd kunnen worden door het toevoegen van een ander verzoek. Vermits men vooral wil focussen op de beloftevolle delen van het zoekgebied, wordt als voorwaarde vooropgesteld dat de waarde van de doelfunctie niet extreem sterk mag verslechteren ten opzichte van de beste oplossing. Wanneer men de oplossing echter niet kan vervolledigen zonder deze drempel of één van de andere opgelegde beperkingen te schenden, eindigt de iteratie hier en wordt de nieuw geconstrueerde oplossing niet aanvaard. De volgende iteratie herbegint dan bij de vorige oplossing. In het andere geval gaat de volgende iteratie verder met de nieuwe oplossing.

Na een aantal iteraties zonder de beste oplossing te verbeteren, wordt een periodieke diversificatie toegepast om zo te kunnen ontsnappen uit het lokale optimum. Hierdoor tracht men de zoektocht te leiden naar een ander gedeelte van de oplossingsruimte. In deze stap wordt het maximale aantal verzoeken (zoals bepaald in het interval) uit een oplossing verwijderd en terug ingevoegd door de verschillende operatoren. Hierbij geldt de eerder opgelegde beperking dat de doelfunctiewaarde niet sterk mag afwijken, niet meer. De oplossing die hier bekomen wordt, moet echter wel nog steeds *feasible* zijn. Indien dit niet het geval is, wordt de periodieke diversificatie herhaald. Wanneer deze dan *feasible* is, vangt het gewone LNS-algoritme terug aan, verder bouwend op deze oplossing. Aangezien een groot gedeelte van de oplossing verwijderd kan worden, zijn er veel oplossingen mogelijk. Het idee achter deze metaheuristiek is dat de *large neighbourhood* toelaat om gemakkelijk in de ruimte te bewegen, zelfs wanneer er veel beperkingen zijn.

3.4 Resultaten

3.4.1 Algemeen

De impact die vertragingen bij het openbaar vervoer hebben, zal nagegaan worden op drie verschillende variabelen. Een eerste variabele is de totale afstand die de DAR-voertuigen afleggen. Deze zal besproken worden omdat dit de doelstelling is die geoptimaliseerd wordt door het algoritme. Het geeft een beeld van de operationele kosten van de DAR-aanbieder, die geminimaliseerd worden. Een tweede variabele is de gemiddelde reistijd over alle klanten heen. Deze variabele wordt onderzocht omdat het een maatstaf voor de kwaliteit van de service is. De impact van vertragingen bij het openbaar vervoer zal nagegaan worden met betrekking tot de gemiddelde tijd die een reiziger onderweg is tussen zijn beginpunt en bestemming. Een laatste factor die bekeken zal worden is het percentage van de reizigers dat gebruik zal maken van het openbaar vervoer om op de eindbestemming te geraken. Hier zal verder naar gerefereerd worden met percentage openbaar vervoer.

Om de impact van vertragingen na te gaan werden er vertragingen opgenomen in de datafiles van de dienstregeling van het openbaar vervoer. Dit werd op een statische manier gedaan, wat wil zeggen dat de vertragingen op voorhand gekend zijn. Dit betekent dat in feite een ondergrens op de werkelijke impact van de vertragingen berekend zal worden. Wanneer de planning al gemaakt is en de informatie omtrent vertragingen in *real time* bekend gemaakt wordt, kan er in het beste geval even goed gereageerd worden op deze informatie. Er kan ook minder goed gereageerd worden, omdat de informatie pas op een later tijdstip bekend raakt dan bij statische vertragingen, namelijk op een tijdstip waarop de ritten al bezig zijn.

Naast de bestaande opsplitsing op basis van de frequentie van de dienstregeling, wordt er ook een opsplitsing gemaakt op basis van de toegekende kans op een vertraging die gehanteerd wordt. Deze kans geeft aan of een rit al dan niet een vertraging oploopt. Er werd hierbij een verschil in kans opgenomen in de piek- en dalperiodes, omdat het zeer waarschijnlijk is dat er meer vertragingen optreden in de piekperiode, aangezien er dan meer mensen onderweg zijn en er dus meer verkeer is. De toegekende kansen bedragen voor de verschillende scenario's 30-15, 40-20 en 50-25 procent voor respectievelijk de piek- en de dalperiode.

Er werd gekozen voor deze specifieke kansen op vertragingen bij het openbaar vervoer in de verschillende scenario's, omdat uit cijfers van De Mobiliteitsraad van Vlaanderen (MORA) blijkt dat de stiptheid van De Lijn gemiddeld 50% bedraagt ("Effecten - stiptheid De Lijn," z.j.). Hiermee bedoelt men dat slechts één op twee bussen zijn eindhalte op tijd bereikt. In 2017 bedroeg dit cijfer zelfs maar 47,3%. Onder op tijd aankomen rekent men alle bussen die tussen twee minuten eerder en vijf minuten later dan de geplande aankomsttijd aankomen. Wanneer er gekozen werd voor bovenstaande kansen op vertragingen werd gemiddeld op een percentage van de ritten dat op tijd kwam van respectievelijk 40, 50 en 55 procent uitgekomen. Hierdoor wordt een scenario bekomen waarbij de stiptheid ongeveer overeenstemt met de gegevens van de MORA, alsook een beter en een slechter scenario.

Er werd ook een verdeling aan de vertraging toegekend. Voor de bussen die op tijd aankomen, werd een uniforme verdeling opgesteld. Deze verdeling is gebaseerd op de tijdstippen waarvan men veronderstelt dat een bus nog op tijd is (i.e. tussen twee minuten eerder en vijf minuten later dan de geplande aankomsttijd). Hierbij werd echter de mogelijkheid dat een bus te vroeg kan aankomen, ter vereenvoudiging niet opgenomen. Er werd daarom een kans van $\frac{3}{8}$ toegekend aan het scenario waar er een vertraging is van nul minuten. Aan de andere vertragingen van respectievelijk één tot en met vijf minuten werd elk een kans van $\frac{1}{8}$ toegekend.

Een bus wordt pas als vertraagd beschouwd wanneer zijn vertraging groter dan vijf minuten is. Hiervoor werd eveneens gewerkt met een uniforme verdeling van de vertragingen. Er werd hierbij een maximumvertraging van tien minuten ingesteld, omdat bij veelvoorkomende grotere vertragingen het integreren van het openbaar vervoer in realiteit niet overwogen zou worden omwille van de onbetrouwbaarheid van het systeem.

Eerst zal een globaal scenario besproken worden om te kijken wat de algemene impact van de vertragingen is. Daarna zullen er verschillende scenario's uitgewerkt worden voor de drie verschillende variabelen. Er zal hierbij achtereenvolgens gekeken worden naar de invloed die de frequentie van het openbaar vervoer, het percentage spitsreizigers en de maximale reistijdfactor die werd toegekend, hebben op de totale afstand die de DAR-voertuigen afleggen, de gemiddelde reistijd van alle klanten en het percentage openbaar vervoer.

Enkele hypotheses worden opgesteld met betrekking tot de verwachte resultaten. Een eerste reeks hypotheses heeft betrekking op de algemene relaties tussen de drie variabelen en de verschillende scenario's. Deze werden opgesteld zonder de vertragingen al in acht te nemen en ze worden op de volgende pagina weergegeven.

Hypothese 1a: De totale afstand van de DAR-voertuigen is negatief gerelateerd aan de frequentie van het openbaar vervoer, aan het aantal spitsreizigers en aan de maximale reistijdfactor.

Hypothese 1b: De gemiddelde reistijd is positief gerelateerd aan de frequentie van het openbaar vervoer, aan het aantal spitsreizigers en aan de maximale reistijdfactor.

Hypothese 1c: De gemiddelde reistijd van reizigers wiens route gebruik maakt van het openbaar vervoer ligt hoger dan deze van reizigers die enkel met een DAR-voertuig reizen.

Hypothese 1d: Het percentage openbaar vervoer is positief gerelateerd aan de frequentie van het openbaar vervoer, aan het aantal spitsreizigers en aan de maximale reistijdfactor.

Deze hypothesen werden opgesteld omdat er verwacht wordt dat wanneer er meer bussen rijden en de frequentie dus hoger ligt, meer reizigers een gedeelte van hun rit zullen afleggen met het openbaar vervoer. Hierdoor zal de afstand die de DAR-voertuigen afleggen, waarschijnlijk afnemen, aangezien de bestemmingen nu meer geclusterd zullen zijn. De gemiddelde reistijd van de reizigers neemt vermoedelijk toe. Bij een rit waarbij er gebruik gemaakt wordt van meerdere vervoersmodi, zal er immers rekening gehouden moeten worden met een overstaptijd. De toename in de gemiddelde reistijd van alle reizigers zal vervolgens veroorzaakt worden door het feit dat meer reizigers een rit zullen maken waarbij de twee modi gecombineerd worden. Wat het aantal spitsreizigers betreft, werden dezelfde relaties vooropgesteld, aangezien er meer OV-verbindingen zijn in de spits en er verwacht wordt dat de kans dat een klant gebruik zal maken van het openbaar vervoer daardoor zal stijgen. Dit leidt dan vervolgens tot dezelfde reacties als hierboven beschreven. Aangezien het nemen van het openbaar vervoer vaak geassocieerd wordt met een langere reistijd, omwille van onder meer overstaptijden, wordt er eveneens voorspeld dat de kans dat een klant gebruik maakt van het openbaar vervoer groter wordt wanneer er een langere maximale reistijd voorzien wordt. In conclusie kan er dus gesteld worden dat een grotere kans op het gebruik van openbaar vervoer leidt tot een kleinere afgelegde afstand van de DAR-voertuigen en een hogere gemiddelde reistijd.

Er werden ook enkele hypothesen opgesteld die verband houden met de vertragingen die opgenomen zullen worden.

Het opnemen van vertragingen zal er waarschijnlijk toe leiden dat er minder ritten zullen zijn waarbij er een combinatie gemaakt wordt met het openbaar vervoer. Vertragingen bij het openbaar vervoer zorgen er namelijk voor dat de reistijd toeneemt en dat reizigers langer onderweg zijn. Er wordt echter een beperking opgelegd met betrekking tot de maximale reistijd voor een reiziger. Om aan deze voorwaarde te blijven voldoen, zullen er bijgevolg minder ritten de combinatie met het openbaar vervoer maken. Hierdoor zal de totale afstand die de DAR-voertuigen afleggen, waarschijnlijk terug toenemen. Dit leidt tot volgende hypothesen:

Hypothese 2a: Het opnemen van vertragingen heeft als effect dat de totale afstand van de DAR-voertuigen toeneemt.

Hypothese 2b: Het opnemen van vertragingen heeft als effect dat de kans dat een klant gebruik maakt van het openbaar vervoer afneemt.

Hypothese 2c: Het opnemen van vertragingen heeft als effect dat de reistijd van de reizigers toeneemt.

Vermoedelijk zullen vertragingen vooral een probleem vormen wanneer de frequentie van de dienstregeling lager ligt. Het wachten op een volgende bus zal in dat geval namelijk langer duren dan bij een frequentere dienstregeling. Hoewel hiermee niet direct gezegd is dat wachttijden geen probleem kunnen vormen in een situatie met een frequentere dienstregeling, aangezien zelfs in dit scenario tijdvensters geschonden kunnen worden. Toch wordt verwacht dat de impact in zo'n geval kleiner zal zijn. Een grotere kans op vertragingen zal waarschijnlijk ook een grotere impact hebben wanneer de maximale reistijdfactor kleiner is. Er is in dat geval namelijk minder bewegingsruimte voor vertragingen, aangezien een klant minder lang onderweg mag zijn. Wat het aantal spitsreizigers betreft, wordt verwacht dat vertragingen een grotere impact hebben wanneer er meer spitsreizigers zijn, aangezien de kans op een vertraging groter is tijdens de spitsuren. Dit effect wordt echter tegengewerkt door het feit dat de frequentie in de spits altijd hoger ligt. Daarom werden volgende hypothesen opgesteld:

Hypothese 2d: Het effect van (grote) vertragingen weegt zwaarder door bij een lagere frequentie van de dienstregeling van het openbaar vervoer.

Hypothese 2e: Het effect van (grote) vertragingen weegt zwaarder door wanneer de maximale reistijdfactor kleiner is.

Hypothese 2f: Het effect van (grote) vertragingen weegt zwaarder door wanneer er meer spitsreizigers zijn, omwille van de grotere kans op een vertraging in de spits.

Hypothese 2g: Het effect van (grote) vertragingen weegt minder zwaar door wanneer er meer spitsreizigers zijn, omwille van de hogere frequentie van het openbaar vervoer in de spits.

Vervolgens zullen de resultaten besproken worden, startend met die van het globaal scenario.

3.4.2 Resultaten globaal scenario

Eerst zullen de resultaten van het globaal scenario besproken worden. Dit wil zeggen dat er over alle scenario's heen gekeken wordt en er geen onderscheid gemaakt zal worden op basis van de frequentie van het openbaar vervoer, het aantal spitsreizigers of de maximale reistijdfactor. Er wordt een vergelijking gemaakt tussen een scenario waarin er geen openbaar vervoer wordt opgenomen, een scenario waarin het openbaar vervoer wel wordt opgenomen en er geen kans is op vertragingen en een derde scenario waarin het openbaar vervoer ook wordt opgenomen en waar er wel een kans

bestaat dat er vertragingen zullen optreden. De verschillende scenario's met betrekking tot de kans op vertragingen worden hier evenwel nog buiten beschouwing gelaten.

Tabel 2 geeft de resultaten weer van het globale scenario. Deze geven weer dat de totale afstand die afgelegd wordt door de DAR-voertuigen afneemt wanneer het openbaar vervoer geïntegreerd wordt in het DARP. Wanneer er vervolgens vertragingen opgenomen worden in de datafiles, neemt de afstand die de DAR-voertuigen afleggen, terug toe. Deze afstand is echter nog steeds kleiner dan wanneer er geen openbaar vervoer wordt opgenomen, wat aantoont dat het integreren van het openbaar vervoer nog altijd een voordeel met zich meebrengt, zelfs wanneer er vertragingen zijn.

Wanneer het openbaar vervoer opgenomen wordt, neemt de gemiddelde reistijd, zoals verwacht, toe. Hij neemt meer bepaald toe van 20,12 minuten naar 20,82 minuten. Dit is waarschijnlijk het gevolg van het feit dat enkele klanten nu gebruik zullen maken van het openbaar vervoer, waarbij er rekening gehouden zal moeten worden met overstaptijden. Wanneer er vertragingen bij het openbaar vervoer mogelijk zijn, neemt de gemiddelde reistijd terug af naar 20,76 minuten. Een mogelijke verklaring hiervoor is het feit dat er waarschijnlijk een kleiner aantal klanten gebruik zal maken van het openbaar vervoer in dit geval, waardoor de kortere reistijd van de klanten die enkel met DAR-voertuigen reizen zwaarder zal doorwegen. Het percentage openbaar vervoer neemt ook af wanneer vertragingen worden opgenomen. Dit is eveneens logisch aangezien vertragingen tot een langere reistijd kunnen leiden en er nog steeds voldaan moet worden aan de beperkingen van de tijdvensters en de opgelegde maximale reistijd. De combinatie hiervan zorgt ervoor dat er minder ritten gebruik zullen maken van het openbaar vervoer. Zoals eerder aangehaald, hangen de drie variabelen vrijwel altijd samen. Door het feit dat er minder ritten gebruik zullen maken van het openbaar vervoer, zal de totale afstand die de DAR-voertuigen afleggen, toenemen, aangezien zij terug een groter deel van de ritten voor hun rekening nemen. De gemiddelde reistijd zal in dat geval afnemen, aangezien de langere reistijd van de ritten met openbaar vervoer minder zwaar zal doorwegen.

Tabel 2. Resultaten globaal scenario: geen integratie met openbaar vervoer, geen vertragingen en wel vertragingen bij het openbaar vervoer

	Geen OV	OV- Geen vertragingen	OV -Vertragingen
Totale afstand DAR-voertuigen (in km)	2741,83	2442,67	2505,41
Gemiddelde reistijd over alle klanten (in min)	20,12	20,82	20,76
Percentage openbaar vervoer	n.v.t.	17,02%	13,89%

De gemiddelde reistijd die in Tabel 2 weergegeven wordt, is deze over alle reizigers. Wanneer er vervolgens een onderscheid gemaakt wordt op basis van het feit of een klant gebruik maakt van het openbaar vervoer, komt de gemiddelde reistijd voor reizigers die gebruikmaken van het openbaar vervoer neer op 42,95 minuten voor het scenario zonder en 44,64 minuten voor het scenario met

vertragingen. Er kan bijgevolg wel opgemerkt worden dat vertragingen zorgen voor een toename van de gemiddelde reistijd voor deze reizigers, meer bepaald met 3,93 procent.

Wanneer het openbaar vervoer opgenomen wordt, neemt de gemiddelde reistijd voor reizigers die geen gebruik maken van het openbaar vervoer af van 20,12 minuten naar 16,28 minuten. Dit valt te verklaren door het feit dat de afstand die sommige klanten met een DAR-busje afleggen, afneemt, omdat een deel van de afstand afgelegd zal worden met het openbaar vervoer. Door dit feit maken andere reizigers minder omweg, waardoor ze minder lang onderweg zullen zijn en de gemiddelde reistijd voor deze reizigers dus afneemt. Wanneer er vervolgens een kans op vertraging bij het openbaar vervoer wordt opgenomen, neemt de gemiddelde reistijd voor de reizigers wiens rit geen gebruik maakt van het openbaar vervoer, terug toe met 3,87 procent, namelijk van 16,28 naar 16,91 minuten. Dit valt te verklaren door het feit dat er in het geval van vertragingen terug meer reizigers over een lange afstand reizen met een DAR-voertuig. Hoewel relatieve toename in reistijd voor de twee types reizigers ongeveer gelijk is, geven de absolute verschillen in minuten echter wel weer dat de stijging in absolute reistijd groter is voor OV-gebruikers.

Bij het vergelijken van de gemiddelde reistijd over alle reizigers in de verschillende scenario's wordt er dus in feite een vergelijking gemaakt tussen groepen die moeilijk vergelijkbaar zijn, aangezien het aantal OV-gebruikers over de verschillende scenario's verschilt. Aangezien een kleiner aantal reizigers gebruik maakt van het openbaar vervoer wanneer er vertragingen zijn, zal de lagere reistijd van de reizigers die geen openbaar vervoer gebruiken, zwaarder doorwegen. Dit verklaart de daling in de gemiddelde reistijd over alle reizigers, ondanks het feit dat de reistijden van beide type reizigers toenemen in het scenario met vertragingen.

Om na te gaan of de verschillen tussen de drie scenario's ook significant zijn, werd een Friedmantest uitgevoerd. Deze test gaat na of de gemiddelden van de variabelen gelijk zijn over de verschillende scenario's en dit is met andere woorden de nulhypothese van de test. Er werd voor deze test gekozen omdat de afhankelijke variabele in de gerelateerde groepen niet bij benadering normaal verdeeld is. De normaliteit van de *residuals* werd hiervoor nagegaan en er werd niet voldaan aan de Shapiro-Wilk test voor normaliteit (de p-waarde is 0,00 en daarmee wordt de nulhypothese dat de *residuals* normaal verdeeld zijn, verworpen). Ook bijhorende *Kernel density plots* en Q-Q plots tonen aan dat de afwijkingen van normaliteit niet klein zijn. Deze worden weergegeven in Bijlage 2. Opdat de resultaten van deze test bruikbaar zijn, moet er voldaan worden aan drie assumpties. Een eerste voorwaarde hierbij is dat de afhankelijke variabele (hier: afwisselend de afstand van de DAR-voertuigen, de gemiddelde reistijd en het percentage ritten met openbaar vervoer) een continue variabele is. Aan deze voorwaarde wordt voldaan. Een tweede voorwaarde stelt dat de onafhankelijke variabele moet bestaan uit minstens twee gerelateerde groepen. Ook dit is het geval hier, er is namelijk een eerste groep waarbij het openbaar vervoer nog niet werd opgenomen, een tweede groep waarbij er geen vertragingen worden opgenomen en een derde waar dit wel het geval is. Een gerelateerde groep houdt in dat dezelfde klanten aanwezig zijn in alle groepen, wat hier het geval is, aangezien er vertrokken wordt vanuit dezelfde klantaanvragen. Een derde en laatste assumptie stelt dat er geen significante *outliers* zijn in de groepen, aangezien deze een negatieve invloed kunnen uitoefenen op de test, door de verschillen tussen de groepen te verstoren. Ook hieraan wordt

voldaan. Er werd dus met andere woorden driemaal voldaan aan alle assumpties. Om vervolgens na te gaan waar de verschillen zich exact bevinden, werd ook nog een *Wilcoxon signed-rank* test uitgevoerd, aangezien de Friedmantest niet aangeeft waar de verschillen gesitueerd zijn.

Vervolgens worden deze twee testen uitgevoerd. Uit de resultaten van deze test blijkt dat de verschillen tussen de drie scenario's significant zijn. Wanneer het openbaar vervoer mee opgenomen wordt, neemt de afgelegde afstand van de DAR-voertuigen af, de gemiddelde reistijd toe, evenals het percentage openbaar vervoer. De resultaten tonen verder aan dat wanneer er vertragingen zijn bij het openbaar vervoer, de afstand die de DAR-voertuigen afleggen terug toeneemt, terwijl het percentage openbaar vervoer en de gemiddelde reistijd afnemen. Zoals eerder aangehaald is dit laatste resultaat contra-intuïtief, maar dit valt te verklaren door het feit dat twee verschillende groepen vergeleken worden. Deze drie variabelen hangen vrijwel altijd samen, aangezien het algoritme tracht de totaal afgelegde afstand te minimaliseren. Hoe kleiner deze afstand, hoe meer routes van klanten gebruik zullen maken van het openbaar vervoer en hoe langer de gemiddelde reistijd zal worden, aangezien er rekening gehouden moet worden met overstaptijden. Gegeven het feit dat tijdvensters niet geschonden mogen worden en dat er daarnaast ook rekening gehouden moet worden met de maximale reistijdfactor, zoals hierboven gedefinieerd, zorgen de vertragingen bij het openbaar vervoer ervoor dat er minder gebruik gemaakt zal worden hiervan en dat de DAR-voertuigen terug een groter gedeelte van de ritten zullen bedienen.

Aangezien de klanten die een aanvraag doen, geclusterd wonen, is het interessant om na te gaan of halte 5, die niet in een woonkern gesitueerd is, ook effectief gebruikt wordt. De klanten vragen namelijk een verplaatsing aan naar een andere woonkern of binnen dezelfde woonkern, waardoor halte 5 misschien niet gebruikt zal worden. Na analyse van de resultaten blijkt dat in het scenario zonder vertragingen, deze halte ongeveer elf procent van de keren gebruikt werd. Voor het scenario met vertragingen kwam dit neer op dertien procent. De andere vier haltes worden in beide scenario's iets meer dan twintig procent van de keren gebruikt, wat dus iets vaker is dan halte 5. Dit kan verklaard worden door hun betere ligging. Maar in het algemeen kan er wel geconcludeerd worden dat halte 5 niet per se overbodig is en dat het een nuttige toevoeging kan vormen aan het openbaarvervoernetwerk.

De vergelijking die nu gemaakt werd, is echter globaal. Er werd namelijk geen rekening gehouden met hoe groot de kans op vertragingen is, hoe frequent het openbaar vervoer rijdt, enzovoort. Aansluitend zullen er enkele scenario's uitgewerkt worden, waarbij er wel een onderscheid gemaakt zal worden voor deze verschillende factoren. Er zal hierbij een opsplitsing gemaakt worden voor de drie afhankelijke variabelen, die bestudeerd zullen worden voor de verschillende factoren.

3.4.3 Resultaten voor totale afstand van de DAR-voertuigen

Eerst zal er gekeken worden naar de totale afstand die de DAR-voertuigen afleggen onder verschillende voorwaarden. Deze variabele wordt eerst in beschouwing genomen omdat dit de variabele is die geoptimaliseerd wordt door het LNS-algoritme. Er zal gekeken worden naar de impact van de frequentie van het openbaar vervoer, het aantal spitsreizigers en de maximale reistijdfactor. Het scenario zonder vertragingen zal hierbij ook telkens vergeleken worden met scenario's waarin een verschillende kans op vertraging opgenomen werd.

De resultaten worden weergegeven in Tabel 3, die onderverdeeld is in drie delen, waarbij in elk gedeelte de gemiddelde totale afstand wordt weergegeven op basis van één van de drie factoren en de kans op vertragingen. Daarnaast wordt er ook nog een gemiddelde weergegeven om zo te kunnen kijken naar de impact per factor zelf. De andere factoren zijn ceteris paribus per gedeelte. Deze worden met andere woorden constant gehouden en worden bekeken over alle verschillende scenario's samen.

Uit Tabel 3 kan afgeleid worden dat de totale afstand die afgelegd wordt door de DAR-voertuigen afneemt wanneer het openbaar vervoer geïntegreerd wordt in het DARP. Zelfs wanneer de frequentie van het openbaar vervoer relatief laag ligt en er een grote kans is op vertragingen, is er een verbetering in de totale afstand van 2741,83 km naar 2578,84 km. Dit is een verbetering van 6,32 procent. Wanneer bussen zeer frequent rijden, neemt de totale afstand van de DAR-voertuigen nog verder af. De gestage afname van het aantal kilometer valt ook op in de gemiddelde resultaten per frequentie. Het opnemen van vertragingen zorgt er echter wel voor dat de afstand terug lichtjes toeneemt.

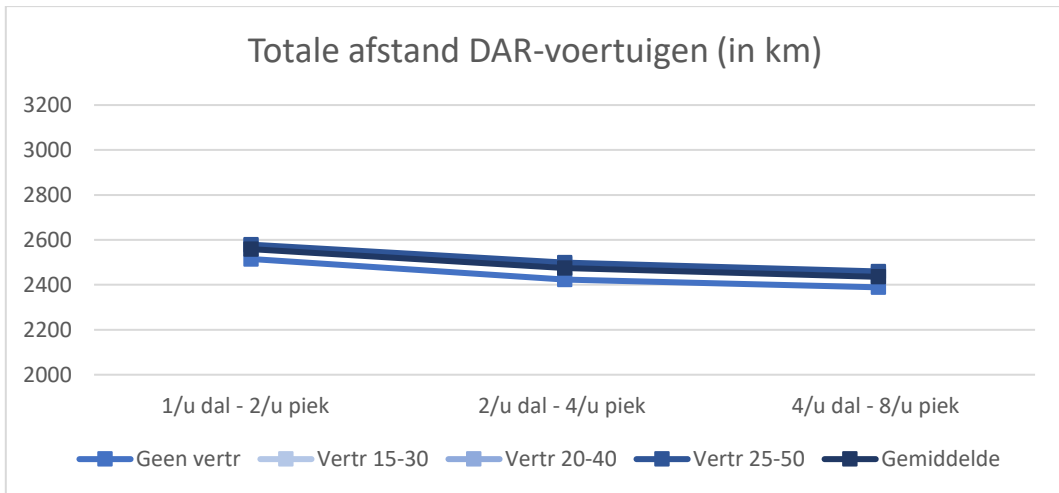
Tabel 3. Totale afstand DAR-voertuigen (in km) op basis van verschillende factoren en verschillende kansen op vertragingen van het openbaar vervoer

Op basis van de frequentie van het openbaar vervoer				
	Geen OV	1/u dal – 2/u piek	2/u dal – 4/u piek	4/u dal – 8/u piek
Zonder vertragingen	2741,83	2515,08	2424,00	2388,92
Vertragingen 15% dal – 30% piek	n.v.t.	2567,57	2481,13	2443,86
Vertragingen 20% dal – 40% piek	n.v.t.	2574,16	2493,93	2450,08
Vertragingen 25% dal – 50% piek	n.v.t.	2578,84	2499,37	2459,73
Gemiddelde	2741,83	2558,91	2474,61	2435,65
Op basis van het aantal spitsreizigers				
	50%	58%	67%	75%
Zonder vertragingen	2452,04	2459,65	2421,64	2437,35
Vertragingen 15% dal – 30% piek	2502,23	2518,05	2475,82	2493,98
Vertragingen 20% dal – 40% piek	2513,10	2526,87	2484,47	2499,79
Vertragingen 25% dal – 50% piek	2518,28	2530,40	2492,43	2509,48
Gemiddelde	2496,41	2508,74	2468,59	2485,15
Op basis van de maximale reistijdfactor				
	1,25	1,5	1,75	2
Zonder vertragingen	3042,98	2505,85	2197,19	2024,66
Vertragingen 15% dal – 30% piek	3074,83	2574,73	2264,33	2076,19
Vertragingen 20% dal – 40% piek	3077,57	2585,33	2273,03	2088,30
Vertragingen 25% dal – 50% piek	3080,71	2592,63	2282,40	2094,84
Gemiddelde	3069,02	2564,63	2254,24	2071,00

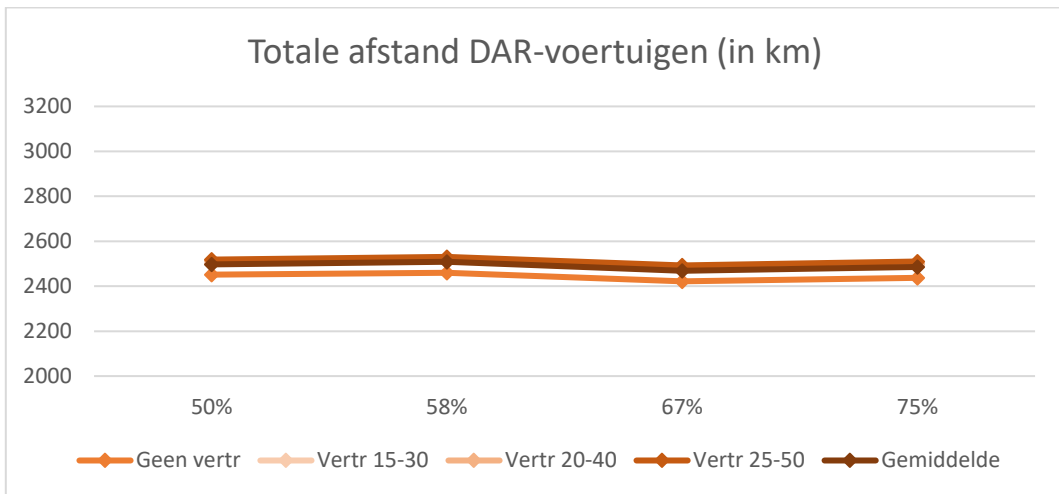
Wanneer er een onderscheid gemaakt wordt op basis van het aantal spitsreizigers, kan er opgemerkt worden dat de totaal afgelegde afstand niet sterk varieert wanneer er meer spitsreizigers zijn. De afstand schommelt rond een gemiddelde en vertoont geen trend in een bepaalde richting. Deze schommelingen kunnen verklaard worden door de stochasticiteit van het algoritme. Verwacht was dat deze impact groter zou zijn, omdat de frequentie van het openbaar vervoer in de spits ook hoger ligt. Wanneer er meer personen tijdens deze periode van de dag vervoerd willen worden, lijkt het dan ook logisch dat het percentage van het aantal ritten dat het openbaar vervoer zal gebruiken, hoger ligt en daardoor de afstand die de DAR-voertuigen afleggen, kleiner. Er kan echter wel waargenomen worden dat wanneer vertragingen bij het openbaar vervoer opgenomen worden, de totale afstand toeneemt en ook dat naarmate de kans op vertragingen groter wordt, er opnieuw telkens een lichte stijging plaatsvindt. Dit laat zien dat de kans op vertragingen wel een rol kan spelen, ongeacht het feit hoeveel spitsreizigers er zijn.

Als laatste kan uit Tabel 3 besloten worden dat de impact die de maximale reistijdfactor heeft op de totaal afgelegde afstand zeer groot is. Dit is een logisch resultaat, aangezien het algoritme de totale afstand wil minimaliseren en hoe langer de tijd toegestaan voor een reiziger om onderweg te zijn, hoe korter de afstand die afgelegd wordt door de DAR-voertuigen, aangezien er meer gebruik gemaakt zal worden van het openbaar vervoer. De stijgingen zijn groot en bedragen tussen acht en twintig procent. Uit de tabel kan afgeleid worden dat vertragingen een impact hebben, maar deze is niet erg groot in vergelijking met de impact van de maximale reistijdfactor zelf. Er werd voorspeld dat de impact van vertragingen op de afgelegde afstand bij een kleinere maximale reistijdfactor groter zou zijn, aangezien er dan minder speling is op de tijd die iemand onderweg mag zijn. Uit de tabel kunnen we echter afleiden dat dit niet echt het geval is en dat de impact van vertragingen bij elke MRT-factor ongeveer gelijk is. Ditzelfde werd eveneens voorspeld voor de frequentie van de dienstregeling. Er werd namelijk verwacht dat vertragingen bij een lagere frequentie van het openbaar vervoer een grotere impact zouden hebben op de afgelegde afstand van de DAR-voertuigen. Deze afstand zou dan sterker toenemen omdat er meer bussen zijn om deze vertraging op te vangen. Uit Tabel 3 kan echter afgeleid worden dat dit niet het geval is. Dit kan verklaard worden door het feit dat de vertragingen bij het opmaken van de planning gekend waren en de frequentie daarom zelf niet echt een invloed uitoefende op de afgelegde afstand en dat de impact enkel afkomstig was van het feit of er vertragingen waren. Ook bij een groter aantal spitsreizigers heeft de kans op een vertraging geen grotere impact. Maar zoals al aangehaald bij het opstellen van de hypothesen, kan dit het gevolg zijn van het feit dat er twee effecten spelen. In de spits is de kans op een vertraging namelijk wel groter, maar rijdt het openbaar vervoer ook frequenter. Uit deze resultaten kan er niet met zekerheid opgemaakt worden dat geen van de twee effecten optreedt of dat ze allebei optreden.

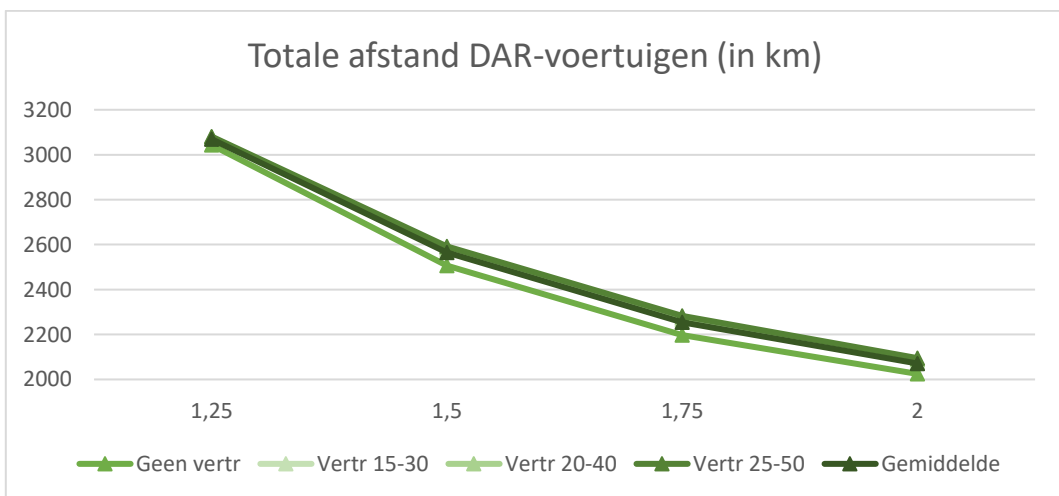
Een grafische voorstelling van de resultaten wordt weergegeven in Figuur 8, Figuur 9 en Figuur 10 op de volgende pagina. Zij tonen de totale afstand van de DAR-voertuigen voor respectievelijk de verschillende frequenties van het openbaar vervoer, het aantal spitsreizigers en de maximale reistijdfactor en dit elk voor de verschillende kansen op vertragingen. Uit deze figuren blijkt eveneens duidelijk dat de impact van de maximale reistijdfactor erg groot is en dat het aantal spitsreizigers geen impact heeft.



Figuur 8. Totale afstand in verhouding tot de frequentie OV

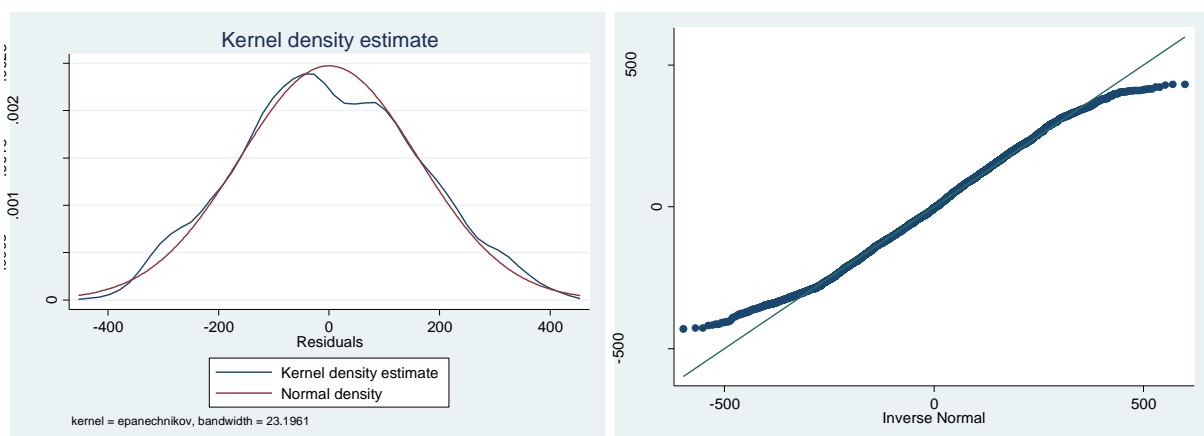


Figuur 9. Totale afstand in verhouding tot het aantal spitsreizigers



Figuur 10. Totale afstand in verhouding tot de maximale reistijdfactor

Er werd vervolgens een *within subjects* ANOVA-test, ook wel een *repeated measures* ANOVA genoemd, uitgevoerd om te kijken of de gevonden verschillen in de totaal afgelegde afstand ook significant zijn. Er werd gekozen voor deze test omdat er gekeken wordt naar verschillen tussen meerdere groepen. De test meet of de gemiddelden van een variabele in meerdere scenario's gelijk zijn (i.e. de nulhypothese van de test). Om de test te kunnen uitvoeren moet er echter wel aan vijf assumpties voldaan worden. Een eerste voorwaarde hierbij is dat de afhankelijke variabele (hier: de afstand van de DAR-voertuigen) een continue variabele is. Aan deze voorwaarde wordt voldaan. Een tweede voorwaarde stelt dat de onafhankelijke variabele moet bestaan uit minstens twee gerelateerde groepen. Ook dit is het geval hier, er zijn namelijk drie verschillende groepen met betrekking tot de dienstregeling van het openbaar vervoer en een vierde groep waar geen openbaar vervoer opgenomen wordt. Een gerelateerde groep houdt in dat dezelfde klanten aanwezig zijn in alle groepen, wat hier het geval is, aangezien er vertrokken wordt vanuit dezelfde klantaanvragen, maar met een verschillende frequentie van de dienstregeling van het openbaar vervoer. Een derde assumptie stelt dat er geen significante *outliers* zijn in de groepen, aangezien deze een negatieve invloed kunnen uitoefenen op de test, door de verschillen tussen de groepen te verstoren. Ook hieraan wordt voldaan. Een volgende veronderstelling zegt dat de afhankelijke variabele in de gerelateerde groepen bij benadering normaal verdeeld moet zijn. Dit mag bij benadering zijn omdat het een vrij robuuste test is, wat wil zeggen dat zelfs wanneer de assumptie licht geschonden wordt, de test nog steeds geldige resultaten kan geven. Normaliteit van de *residuals* werd vervolgens nagegaan en hoewel er niet voldaan werd aan de Shapiro-Wilk test voor normaliteit (de p-waarde is 0,00 en de nulhypothese dat de *residuals* normaal verdeeld zijn wordt daarom verworpen), kunnen we op een *Kernel density plot* en op een Q-Q plot zien dat de afwijkingen van normaliteit niet extreem groot zijn. Deze worden weergegeven in Figuur 11. Bovendien vormt het geen probleem wanneer er genoeg observaties zijn. Een laatste assumptie houdt in dat de varianties van de verschillen tussen de combinaties van de groepen gelijk moeten zijn. Dit wordt sfericiteit genoemd. De resultaten van de Mauchly test voor sfericiteit geven aan dat de data niet voldoet aan deze voorwaarde. Hier kan echter wel voor gecorrigeerd worden.



Figuur 11. *Kernel density estimate* en Q-Q plot van de *residuals*

Na het uitvoeren van de *within subjects*-ANOVA voor de variabele totale afstand van de DAR-voertuigen, tonen de resultaten aan dat het integreren van het openbaar vervoer leidt tot een significante verbetering in de totale afstand van de DAR-voertuigen. Hoe frequenter het openbaar vervoer rijdt, hoe meer de afstand afneemt. Dit wordt geconcludeerd omdat de p-waarde van de *within subjects*-ANOVA 0,000 is. Er werd hier uitgegaan van de p-waarde waarop een Greenhouse-Geisser correctie werd uitgevoerd voor sfericiteit, aangezien dit één van de assumpties was voor de *within subjects*-ANOVA. De frequentie van het openbaar vervoer leidt tot een significante afname in de totale afstand. Uit de resultaten kan vervolgens afgeleid worden dat zelfs het integreren van een minimaal aanbod aan openbaar vervoer leidt tot een daling in de operationele kosten voor de DAR-aanbieder. Dit is positief nieuws, aangezien in meer rurale gebieden het openbaar vervoer minder frequent rijdt. Hoe frequenter er gereden wordt, hoe kleiner het bijkomende voordeel is op de totale afstand van de DAR-voertuigen.

Uit Tabel 3 blijkt dat de invloed die het aantal spitsreizigers heeft, eerder beperkt is. Dit was tegen de verwachtingen in. Er werd namelijk verwacht dat hoe meer spitsreizigers er waren, hoe kleiner de afstand was voor de DAR-voertuigen, gegeven de hogere frequentie van het openbaar vervoer in de spits. Dit bleek echter niet het geval te zijn. Er zijn wel verschillen tussen de groepen, maar geen duidelijke richting waarin het effect loopt. Na het uitvoeren van een *within subjects*-ANOVA bleek de invloed, ondanks de kleine verschillen, toch significant te zijn. Ondanks deze significantie kan de variabiliteit in de resultaten ontstaan zijn door de metaheuristiek. Dit is omdat de schema's van de DAR-diensten flexibel zijn en deze dus, binnen redelijke grenzen, aangepast kunnen worden aan het openbaar vervoer, ook wanneer dit minder frequent rijdt in de daluren.

Het verschil in afstand dat ontstaat bij verschillende maximale reistijdfactoren is eveneens significant. Dit is logisch, want een grotere maximaal toegestane reistijd speelt in het voordeel van het openbaar vervoer dat zorgt voor een verlenging van de reistijd.

Wanneer de verschillende factoren constant gehouden worden en er gekeken wordt naar de verschillen in de kans op vertragingen, blijkt ook hier uit de *within subjects*-ANOVA dat de toename die gevonden wordt, in veel gevallen significant is. Hoe groot de kans op vertragingen exact is, heeft een vrij kleine impact op de totaal afgelegde afstand door de DAR-voertuigen. Het grootste verschil situeert zich dan ook tussen het scenario zonder vertragingen en datgene met. De afstand neemt toe wanneer er een kans op vertragingen mogelijk is. Verder kan er uit de resultaten opgemerkt worden dat de frequentie van de dienstregeling, het aantal spitsreizigers of de grootte van de maximale reistijdfactor niet echt een groot verschil oplevert in het aantal extra gereden kilometer wanneer vertragingen worden opgenomen. Bij het opnemen van vertragingen neemt de afstand in de verschillende scenario's namelijk met ongeveer hetzelfde toe.

De resultaten zijn dus zoals verwacht. Een hogere frequentie van het openbaar vervoer zorgt ervoor dat dit meer gebruikt zal worden, aangezien de DAR-dienst de operationele kosten van het rijden wil minimaliseren. De impact van het aantal spitsreizigers blijkt eerder beperkt te zijn, terwijl de maximale reistijdfactor voor grote verschillen zorgt in afstand. Wanneer de kans op vertragingen echter toeneemt, neemt de afgelegde afstand terug toe ongeacht de factor waarop gefocust wordt.

Dit kan erop wijzen dat minder reizigers gebruik zullen maken van het openbaar vervoer. Vooral het feit dat er een kans bestaat op vertragingen blijkt van belang, niet zozeer de grootte van deze kans.

3.4.4 Resultaten voor gemiddelde reistijd

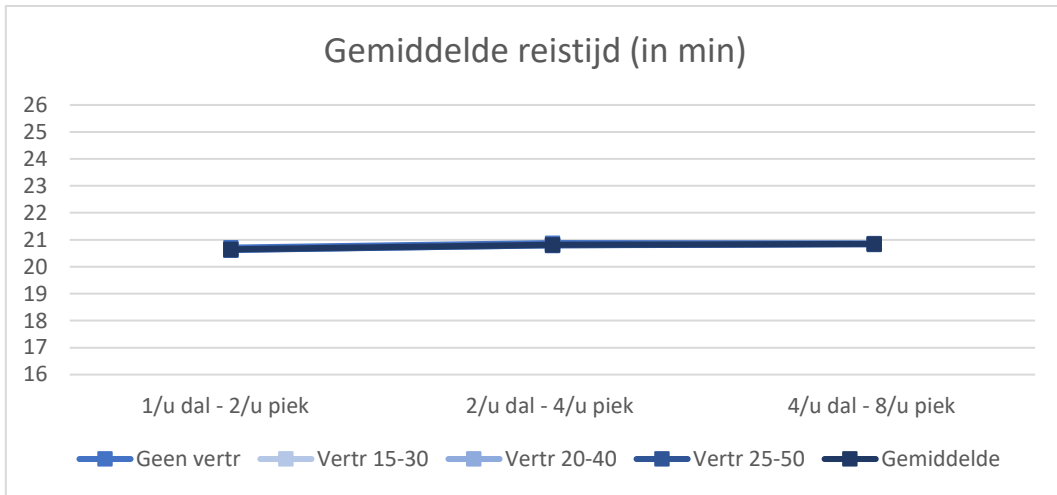
Hierna werd gekeken naar de impact die de verschillende factoren hebben op de gemiddelde reistijd. Dit is een factor die niet geoptimaliseerd wordt door het algoritme. Hij hangt echter wel samen met de totale afstand, aangezien een kortere totale afstand waarschijnlijk leidt tot een langere reistijd.

De resultaten worden weergegeven in Tabel 4, die eveneens onderverdeeld is in drie delen en dezelfde structuur heeft als Tabel 3.

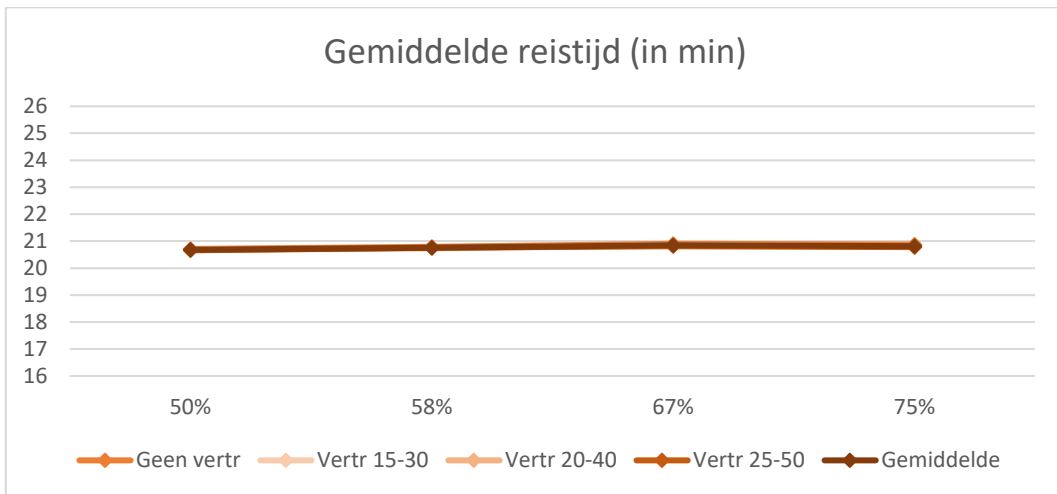
Tabel 4. Gemiddelde reistijd (in min) op basis van verschillende factoren en verschillende kansen op vertragingen van het openbaar vervoer

Op basis van de frequentie van het openbaar vervoer				
	Geen OV	1/u dal – 2/u piek	2/u dal – 4/u piek	4/u dal – 8/u piek
Zonder vertragingen	20,12	20,71	20,88	20,87
Vertragingen 15% dal – 30% piek	n.v.t.	20,63	20,80	20,85
Vertragingen 20% dal – 40% piek	n.v.t.	20,63	20,80	20,85
Vertragingen 25% dal – 50% piek	n.v.t.	20,62	20,80	20,83
Gemiddelde	20,12	20,65	20,82	20,85
Op basis van het aantal spitsreizigers				
	50%	58%	67%	75%
Zonder vertragingen	20,71	20,79	20,90	20,87
Vertragingen 15% dal – 30% piek	20,67	20,73	20,85	20,80
Vertragingen 20% dal – 40% piek	20,68	20,74	20,84	20,79
Vertragingen 25% dal – 50% piek	20,66	20,75	20,81	20,78
Gemiddelde	20,68	20,75	20,85	20,81
Op basis van de maximale reistijdfactor				
	1,25	1,5	1,75	2
Zonder vertragingen	16,45	19,47	22,31	25,04
Vertragingen 15% dal – 30% piek	16,43	19,35	22,22	25,05
Vertragingen 20% dal – 40% piek	16,43	19,35	22,24	25,04
Vertragingen 25% dal – 50% piek	16,42	19,34	22,25	25,00
Gemiddelde	16,43	19,38	22,25	25,03

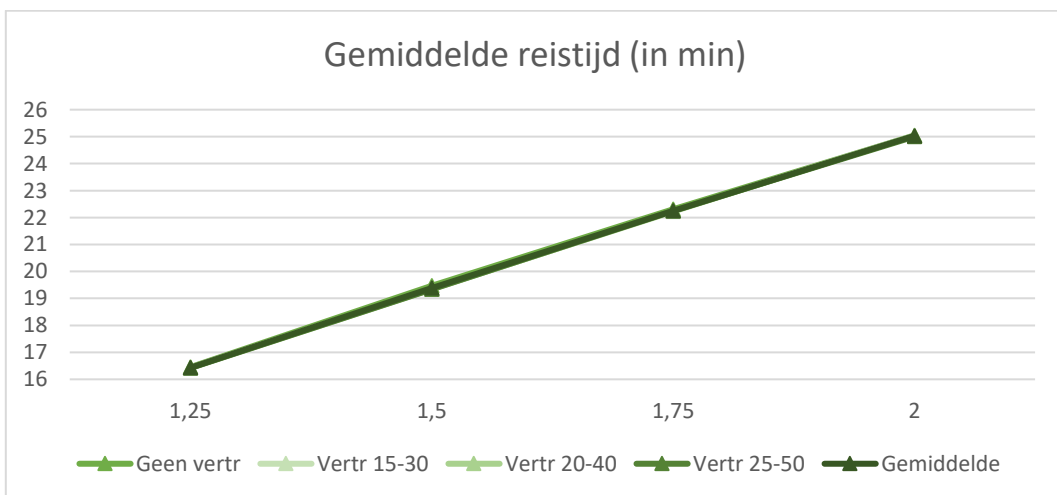
Een grafische voorstelling van de resultaten wordt weergegeven in Figuur 12, Figuur 13 en Figuur 14. Zij tonen de gemiddelde reistijd voor respectievelijk de verschillende frequenties van het openbaar vervoer, het aantal spitsreizigers en de maximale reistijdfactor en dit elk voor de verschillende kansen op vertragingen.



Figuur 12. Gemiddelde reistijd in verhouding tot de frequentie OV



Figuur 13. Gemiddelde reistijd in verhouding tot het aantal spitsreizigers

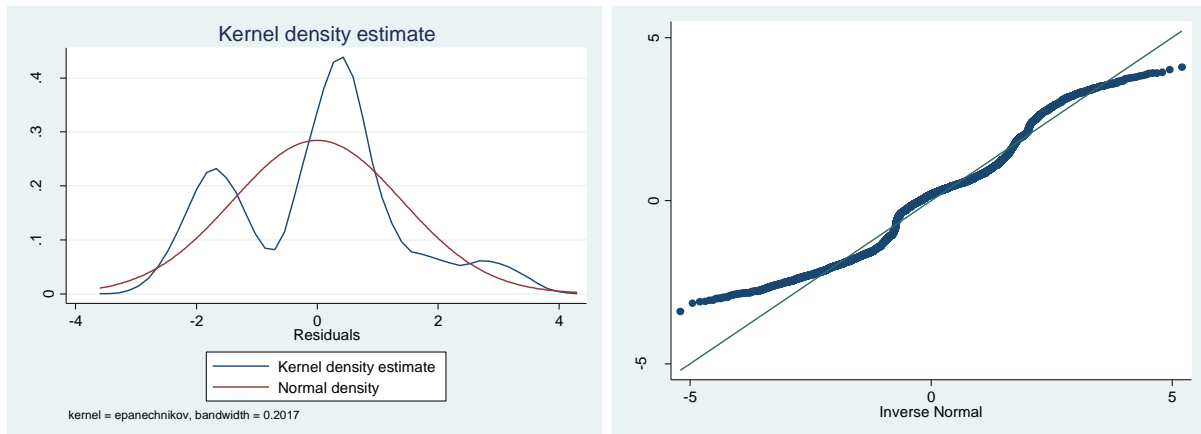


Figuur 14. Gemiddelde reistijd in verhouding tot de maximale reistijdfactor

Uit Tabel 4 kan afgeleid worden dat ongeveer dezelfde ontwikkelingen zich voordoen voor de gemiddelde reistijd. Zo kan er geconcludeerd worden dat de maximale reistijdfactor opnieuw een erg grote invloed heeft, terwijl het aantal spitsreizigers ook voor deze variabele geen impact heeft. Hoe frequent het openbaar vervoer rijdt, heeft een kleine impact op de gemiddelde reistijd. Hoe frequenter er een bus is, hoe meer reizigers ervan gebruik zullen maken en omdat de reistijd voor reizigers met het openbaar vervoer hoger ligt, zal de gemiddelde reistijd toenemen. Wat opvalt, is dat de kans op vertragingen amper een impact heeft op de gemiddelde reistijd. Waar de totale afstand nog geleidelijk toenam bij een grotere kans op vertraging, blijkt dit voor de reistijd geen impact te hebben. In een scenario zonder vertragingen, is de gemiddelde reistijd slechts in enkele gevallen lichtelijk hoger. Dit kan te wijten zijn aan het feit dat wanneer er vertragingen opgenomen worden in het openbaar vervoer, dit een minder aantrekkelijke piste vormt om te reizen van punt A naar punt B. Ook omwille van het feit dat wanneer een reiziger het openbaar vervoer gebruikt op zijn rit, hij langer onderweg is omdat er rekening gehouden moet worden met een overstaptijd. De veronderstelde snelheid voor het openbaar vervoer en de DAR-voertuigen is echter gelijk, wat het kleine verschil in reistijd kan verklaren. Vertragingen hebben dus een lichte positieve invloed op de gemiddelde reistijd, aangezien deze er waarschijnlijk voor zorgen dat er iets minder gebruik gemaakt zal worden van het openbaar vervoer.

Uit de figuren blijkt dat de maximale reistijdfactor als enige een invloed uitoefent op de gemiddelde reistijd. De reistijd blijft namelijk vrijwel stabiel bij wijzigingen in de frequentie van de dienstregeling of het aantal spitsreizigers. Er valt eveneens op dat vertragingen amper een invloed hebben op de gemiddelde reistijd.

Ook hier werd nagegaan of de verschillen significant zijn. Hiervoor werden opnieuw de assumpties van de *within subjects*-ANOVA nagegaan. Er werd echter vastgesteld dat er niet voldaan wordt aan de normaliteitsassumptie voor de *residuals* van de variabelen die betrekking hebben op de gemiddelde reistijd. Zoals bij de totale afstand werd ook hier niet voldaan aan de Shapiro-Wilk test. Maar in tegenstelling tot de totale afstand kan er op een *Kernel density plot* en op een Q-Q plot nu niet vastgesteld worden dat de afwijkingen van normaliteit klein zijn. De twee plots worden weergegeven in Figuur 15 op de volgende pagina. Dit betekent dat de resultaten die een *within subjects*-ANOVA geeft, niet altijd accuraat zijn. Om de significantie van de verschillen na te gaan werd er daarom een Friedmantest gebruikt. Deze vereist namelijk geen normaliteit. De test geeft vervolgens aan of de gemiddeldes tussen bepaalde groepen verschillen. Hij zegt echter niet waar dit verschil zich bevindt. Om te bepalen waar deze zich situeren wordt er vervolgens nog een *Wilcoxon signed-rank* test uitgevoerd.



Figuur 15. *Kernel density estimate* en Q-Q plot van de *residuals*

Er werden dus verschillende significantietesten uitgevoerd. Hieruit blijkt dat wanneer er een onderscheid wordt gemaakt tussen de verschillende frequenties, er een significant verschil bestaat tussen het toevoegen van het openbaar vervoer en ook tussen een frequentie van twee bussen per uur en vier bussen per uur. Een toename tot acht bussen per uur zorgt echter niet voor een significante toename van de gemiddelde reistijd. Dit kan verklaard worden door het feit dat wanneer bussen zo frequent rijden, dit niet dadelijk een grote impact heeft op hoeveel reizigers gebruik maken van het openbaar vervoer. De reistijd zelf wordt dan niet zo erg beïnvloed.

De verschillen in de gemiddelde reistijd bij een wijzigend aantal spitsreizigers zijn heel klein en net zoals bij de afstand van de DAR-voertuigen is er geen duidelijke richting in deze verschillen. Toch bleken de verschillen groot genoeg om significant te zijn. Maar ook hier kan de bemerking gemaakt worden dat de verschillen ontstaan zijn door de variabiliteit van de metaheuristiek zelf en dat het aantal spitsreizigers dus geen impact heeft. Verwacht was dat de gemiddelde reistijd zou toenemen bij meer spitsreizigers, aangezien er voorspeld werd dat meer reizigers gebruik gingen maken van het openbaar vervoer, wanneer er meer personen reizen tijdens de periode wanneer het openbaar vervoer frequenter rijdt.

De verschillen die ontstaan omwille van de wijzigende maximale reistijdfactor zijn allemaal significant. Hoe groter deze factor wordt, hoe groter de gemiddelde reistijd. Dit heeft te maken met het feit dat wanneer er een grotere maximale reistijd toegestaan wordt, een langere reistijd ook vaker zal voorvallen en bijgevolg zal de gemiddelde reistijd sterk toenemen bij een grotere maximale reistijdfactor.

Tussen de verschillende kansen op vertragingen zelf bevinden zich geen significante verschillen bij alle drie de variabelen. Er situeert zich wel een verschil in het feit of vertragingen opgenomen worden of niet. Vanaf het moment dat er vertragingen zijn, neemt de gemiddelde reistijd in alle scenario's lichtjes af. Dit kan verklaard worden door het feit dat er minder ritten gebruikmaken van het openbaar vervoer wanneer er zich hier vertragingen voordoen. Het openbaar vervoer houdt een verlenging van de reistijd in, omdat er rekening moet gehouden worden met een overstaptijd. De snelheid van de twee vervoersmiddelen is immers hetzelfde.

Dit opgegeven reistijden in Tabel 4 zijn echter gemiddeldes over alle reizigers heen. Het is ook nuttig om te kijken naar de gemiddelde reistijden van de reizigers die gebruik maken van het openbaar vervoer en deze die dat niet doen, om na te gaan of hun reistijd sterk afwijkt van dit gemiddelde. De gemiddelde reistijden voor de verschillende scenario's worden weergegeven in Tabel 5. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen de verschillende scenario's en worden eveneens de reistijden weergegeven wanneer er vertragingen mogelijk zijn en wanneer dit niet het geval is. De verschillende kansen op vertragingen werden samengenomen om het overzichtelijk te houden. Er werd wel onderaan de tabel een opsplitsing gemaakt op basis van de verschillende kansen op vertragingen om te kijken of deze ook een impact zouden kunnen hebben.

Tabel 5. Gemiddelde reistijd (in min) op basis van de verschillende factoren en het feit of een reiziger het openbaar vervoer al dan niet gebruikt

		Op basis van de frequentie van het openbaar vervoer			
		Geen OV	1/u dal – 2/u piek	2/u dal – 4/u piek	4/u dal – 8/u piek
Zonder OV	Vertraging	20,12	17,67	16,72	16,29
	Geen vertraging	20,12	17,10	16,03	15,73
Met OV	Vertraging	n.v.t.	46,30	44,60	43,65
	Geen vertraging	n.v.t.	44,12	42,90	42,06
		Op basis van het aantal spitsreizigers			
		50%	58%	67%	75%
Zonder OV	Vertraging	16,76	16,94	16,96	16,90
	Geen vertraging	16,14	16,35	16,33	16,24
Met OV	Vertraging	45,12	44,71	44,81	44,78
	Geen vertraging	43,16	42,81	43,12	43,05
		Op basis van de maximale reistijdfactor			
		1,25	1,5	1,75	2
Zonder OV	Vertraging	16,11	16,62	17,15	17,91
	Geen vertraging	15,94	15,80	16,25	17,21
Met OV	Vertraging	35,80	40,56	44,22	47,94
	Geen vertraging	33,32	39,28	42,68	46,58
		Op basis van de kans op vertragingen			
		Geen	15-30	20-40	25-50
Zonder OV		16,28	16,80	16,90	16,97
Met OV		42,95	44,67	44,80	45,08

Wat opvalt is dat reizigers die het openbaar vervoer gebruiken altijd langer onderweg zijn en dat de reistijden van beide types reizigers toenemen wanneer er vertragingen mogelijk zijn. Hierbij kan opgemerkt worden dat wanneer er vertragingen mogelijk zijn, de reistijden voor reizigers met het openbaar vervoer sterker toenemen dan voor de andere reizigers. Er kan verder opgemerkt worden dat waar de gemiddelde reistijd nog toeneemt bij een hogere frequentie van het openbaar vervoer,

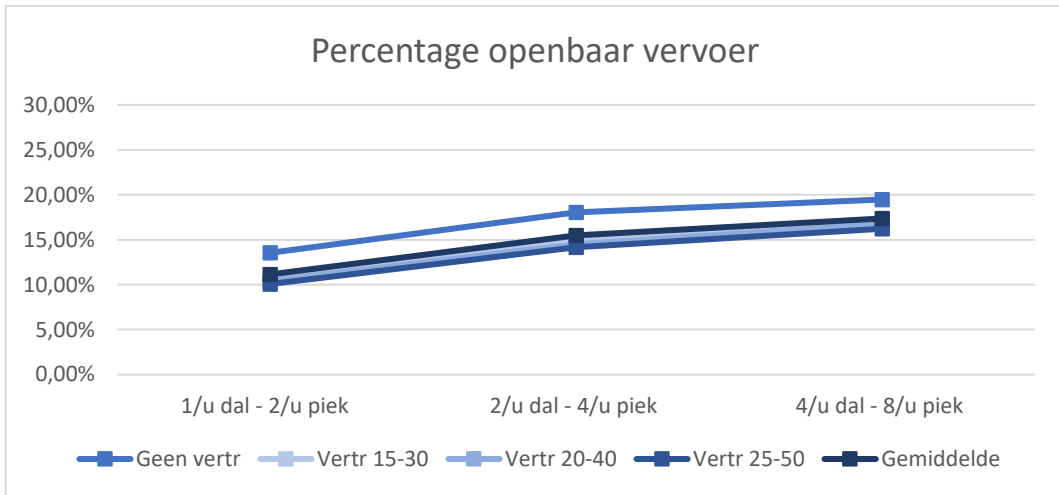
dit voor beide type reizigers afneemt wanneer ze apart bekeken worden. De wijzigingen die ontstaan in de gemiddelde reistijd zoals ze in Tabel 4 hierboven zijn weergegeven, zijn dus het gevolg van hoeveel reizigers in een bepaald scenario gebruik maken van het openbaar vervoer. Hoe groter dit percentage namelijk is, hoe zwaarder de grotere reistijd doorweegt bij het berekenen van de gemiddelde reistijd. De verklaring dat de gemiddelde reistijd dus toeneemt omdat er meer gebruik gemaakt wordt van het openbaar vervoer is dus correct, aangezien de reistijd met het openbaar vervoer langer is. Verder blijkt uit Tabel 5 ook dat de impact van het aantal spitsreizigers nog steeds niet van belang is en dat het zich ook hier weer niet in een specifieke richting beweegt. De maximale reistijdfactor heeft een grote invloed op de reistijd voor reizigers die het openbaar vervoer gebruiken, zeker in vergelijking met de reizigers die dit niet doen. Een andere bemerking die gemaakt kan worden, is het feit dat de relatieve verschillen in de reistijd tussen de verschillende scenario's wel gelijk blijven, ongeacht of een vertraging mogelijk is of niet. Het enige verschil is het feit dat bij vertragingen de algemene reistijd hoger ligt. Voor reizigers die het openbaar vervoer niet gebruiken, valt dit te verklaren door het feit dat er nu minder personen met het openbaar vervoer reizen en er hierdoor terug meer kilometers afgelegd zullen moeten worden door de DAR-voertuigen, waardoor de kans groter is dat het traject een omweg bevat. Dit zorgt ervoor dat de reistijd terug toeneemt. Ook de vertragingen zelf kunnen ervoor zorgen dat deze reizigers langer onderweg zijn. Wanneer een voertuig namelijk langer moet wachten aan een bushalte dan voorzien, neemt de reistijd voor de personen die op dat moment aanwezig zijn in het voertuig ook toe.

3.4.5 Resultaten voor percentage openbaar vervoer

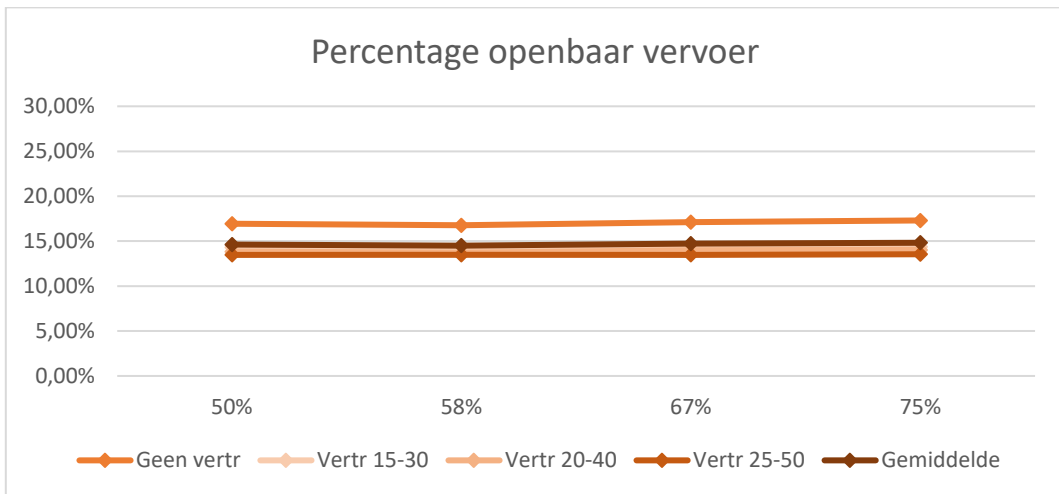
Als laatste wordt er ook gekeken naar de impact op het percentage van reizigers wiens rit het openbaar vervoer bevat. Dit is net zoals de gemiddelde reistijd geen geoptimaliseerde variabele. Maar er bestaat eveneens wel een zekere relatie tussen de totale afstand en het percentage openbaar vervoer. De resultaten die verkregen werden, worden weergegeven in Tabel 6 op pagina 48.

Iets wat opvalt, is het feit dat wanneer het openbaar vervoer mee wordt opgenomen in het probleem, hier zeker ook gebruik van gemaakt wordt. Hoe frequenter de dienstregeling, hoe hoger het gebruik zelfs ligt. Hierbij valt echter op dat de overstap van vier keer een bus per uur naar acht keer per uur in de spitsuren een kleiner effect heeft dan de overstap van twee naar vier bussen per uur, dankzij de flexibiliteit in de DAR-schema's. Wanneer een kans op vertragingen wordt opgenomen, daalt het gebruik van openbaar vervoer licht, maar dit reduceert zeker niet tot nul. De kans op vertraging zelf heeft een vrij kleine impact. Ook hier kan er opgemerkt worden dat het aantal spitsreizigers niet echt een invloed uitoefent op het percentage openbaar vervoer. De maximale reistijdfactor heeft opnieuw een erg grote impact.

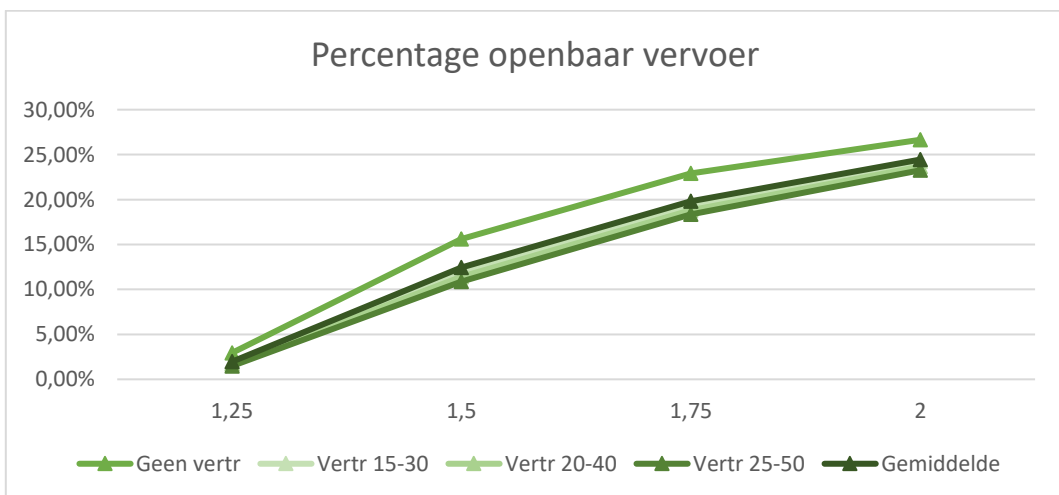
Een grafische weergave van de resultaten wordt weergegeven in Figuur 16, Figuur 17 en Figuur 18. Zij tonen het percentage openbaar vervoer voor respectievelijk de verschillende frequenties van het openbaar vervoer, het aantal spitsreizigers en de maximale reistijdfactor en dit elk voor de verschillende kansen op vertragingen. Uit de figuren blijkt dat de impact van het aantal spitsreizigers zeer beperkt is, terwijl de impact van de maximale reistijdfactor zeer groot is.



Figuur 16. Percentage OV in verhouding tot de frequentie van het OV



Figuur 17. Percentage OV in verhouding tot het aantal spitsreizigers



Figuur 18. Percentage OV in verhouding tot de maximale reistijdfactor

Tabel 6. Percentage openbaar vervoer op basis van verschillende factoren en verschillende kansen op vertragingen van het openbaar vervoer

Op basis van de frequentie van het openbaar vervoer				
	Geen OV	1/u dal – 2/u piek	2/u dal – 4/u piek	4/u dal – 8/u piek
Zonder vertragingen	n.v.t.	13,55%	18,04%	19,48%
Vertragingen 15% dal – 30% piek	n.v.t.	10,56%	15,25%	17,03%
Vertragingen 20% dal – 40% piek	n.v.t.	10,43%	14,51%	16,72%
Vertragingen 25% dal – 50% piek	n.v.t.	10,08%	14,17%	16,23%
Gemiddelde	n.v.t.	11,15%	15,49%	17,37%
Op basis van het aantal spitsreizigers				
	50%	58%	67%	75%
Zonder vertragingen	16,92%	16,77%	17,10%	17,30%
Vertragingen 15% dal – 30% piek	14,31%	14,01%	14,42%	14,38%
Vertragingen 20% dal – 40% piek	13,82%	13,71%	13,99%	14,03%
Vertragingen 25% dal – 50% piek	13,47%	13,49%	13,47%	13,54%
Gemiddelde	14,63%	14,50%	14,74%	14,82%
Op basis van de maximale reistijdfactor				
	1,25	1,5	1,75	2
Zonder vertragingen	2,94%	15,59%	22,91%	26,65%
Vertragingen 15% dal – 30% piek	1,75%	11,94%	19,22%	24,23%
Vertragingen 20% dal – 40% piek	1,67%	11,42%	18,80%	23,66%
Vertragingen 25% dal – 50% piek	1,48%	10,88%	18,35%	23,26%
Gemiddelde	1,96%	12,45%	19,82%	24,45%

Er wordt ook voor deze variabele nagegaan of de verschillen significant zijn. Hiervoor kan er terug gebruik gemaakt worden van de *within subjects*-ANOVA, aangezien de normaliteitsassumptie hier niet geschonden wordt. De *Kernel density plot* en de Q-Q plot voor het percentage openbaar vervoer worden weergegeven in Bijlage 3.

De test geeft aan dat zowel de verschillen op basis van de frequentie als deze op basis van de maximale reistijdfactor significant zijn. Het aantal spitsreizigers heeft geen significante invloed op hoeveel reizigers gebruik maken van het openbaar vervoer. Wat de kans op vertragingen betreft, zijn deze ook hier het grootst wanneer er een kans op vertraging bestaat en zijn de verschillen tussen de verschillende kansen zelf relatief klein.

De resultaten zijn dus gelijkaardig met wat bekomen werd voor de totale afstand in sectie 3.4.3 en voor de gemiddelde reistijd in sectie 3.4.4.

3.4.6 Conclusie

Een algemene conclusie die getrokken kan worden uit de voorgaande resultaten is het feit dat de drie variabelen die apart onderzocht werden vaak samenhangen. Hoewel het algoritme enkel de totale afstand van de dial-a-ride voertuigen minimaliseert, zal dit ook een effect hebben op de gemiddelde reistijd van de klanten en op het percentage openbaar vervoer.

Wat nog geconcludeerd kan worden, is dat de impact van de maximale reistijdfactor altijd significant is, ongeacht de variabele die bekeken wordt. Het aantal spitsreizigers heeft geen duidelijke impact en is zelfs onduidelijk qua richting. De invloed die de frequentie van het openbaar vervoer heeft, is daarnaast ook significant. Wat de gemiddelde reistijd betreft, kan er opgemerkt worden dat de reistijd van de reizigers die gebruik maken van het openbaar vervoer beduidend hoger ligt dan de reistijd van de reizigers die dit niet doen. Van de hypothesen, geformuleerd in sectie 3.4.1, worden hypothesen 1a, 1c en 1d bijgevolg niet verworpen. Enkel hypothese 1b met betrekking tot het aantal spitsreizigers wordt verworpen. Hiermee wordt nogmaals bevestigd dat dit aantal geen impact heeft op de kosten van de DAR-aanbieder.

Hypothese 2a, die stelde dat het opnemen van vertragingen als effect heeft dat de totale afstand van de DAR-voertuigen toeneemt, wordt niet verworpen. Uit de resultaten blijkt namelijk dat de afstand significant toeneemt bij het opnemen van vertragingen, aangezien de verschillen bij verschillende kansen op vertragingen significant zijn. De verschillen zijn echter wel klein wanneer er gekeken wordt naar de kansen onderling. Ook het percentage openbaar vervoer neemt af wanneer er vertragingen worden opgenomen. Deze impact bleek, ondanks de kleine verschillen, significant, waardoor hypothese 2b niet verworpen wordt. Ook de gemiddelde reistijd van reizigers neemt toe wanneer er vertragingen worden opgenomen. Hypothese 2c wordt met andere woorden ook niet verworpen. De impact van hoe groot de kans op de vertragingen net is, is hier echter eveneens kleiner dan het feit of er al dan niet vertragingen zijn.

Hypothese 2d, die stelde dat vertragingen een grotere impact hebben bij een lagere frequentie van het openbaar vervoer, wordt verworpen. Wanneer er vertragingen optreden, blijkt de afname van het percentage openbaar vervoer bij de laagste frequentie namelijk ongeveer even groot te zijn als bij de grootste frequentie. Ditzelfde geldt voor de afgelegde afstand van de DAR-voertuigen en voor de gemiddelde reistijd. Dit resultaat is contra-intuïtief omdat wanneer er meer bussen rijden, vertragingen sneller opgevangen kunnen worden, waardoor verwacht werd dat de impact van een vertraging bij een hogere frequentie kleiner is. Ook hypothese 2e wordt verworpen. Het effect van vertragingen weegt namelijk niet zwaarder door wanneer de maximale reistijdfactor kleiner is. Ook dit is contra-intuïtief, omdat er bij een kleinere reistijdfactor minder marge is op de tijd die een persoon onderweg mag zijn, waardoor vermoed werd dat vertragingen in dit geval een grotere invloed zouden hebben. Beide conclusies zouden verklaard kunnen worden door het feit dat de vertragingen op voorhand gekend zijn, waardoor het algoritme hier rekening mee kan houden. In het geval deze niet op voorhand gekend zouden zijn, kan het zijn dat deze veronderstellingen alsnog waar zijn. Ook hypothesen 2f en 2g worden verworpen. Deze hypothesen stellen dat de grootte van de kans op vertragingen enerzijds een grotere invloed zou uitoefenen op de drie variabelen wanneer er meer spitsreizigers zijn omdat er een grotere kans op vertragingen is in de spits en anderzijds dat

deze grootte een kleinere invloed zou uitoefenen omdat de frequentie van het openbaar vervoer in de spits hoger ligt. Uit de resultaten blijkt dat er geen effect optreedt. Dit kan betekenen dat beide effecten ofwel beide onbestaande zijn en dus niet significant of dat de twee effecten afzonderlijk misschien wel bestaan, maar dat ze elkaar opheffen.

De impact van de grootte van de kans op vertraging, is dus eerder beperkt. Deze geringe impact kan deels verklaard worden door het feit dat de vertragingen op voorhand gekend zijn en het algoritme dus weet welke vertragingen zullen plaatsvinden en hier bijgevolg rekening mee kan houden. Het weet op welk tijdstip een bus met vertraging op zijn bestemming zal aankomen en houdt hier rekening mee in het maken van de beslissing om een reiziger al dan niet met het openbaar vervoer te laten reizen. Wanneer deze vertragingen echter niet op voorhand gekend zijn, zal de impact van de grootte van de kans op een vertraging waarschijnlijk groter zijn.

Er zijn echter wel een aantal randvoorwaarden waaronder deze conclusies gelden, zoals bijvoorbeeld de structuur van het netwerk. Er werd namelijk gewerkt met een geclusterde vraag. De bekomen resultaten kunnen anders zijn wanneer klanten verspreider wonen. Er werd eveneens een veronderstelling gemaakt over het aantal klanten dat een verre verplaatsing maakt. Als deze assumptie verandert, kunnen de resultaten ook verschillend zijn.

4. Conclusie en discussie

4.1 Conclusie

De mobiliteitssituatie in Vlaanderen zal vanaf 2020 grondig veranderen. Het concept basisbereikbaarheid zal dan namelijk ingevoerd worden. Dit leidde tot een eerste deelonderzoeksvraag over de verwachte voordelen van deze nieuwe situatie. Uit de literatuurstudie blijkt dat één van de voordelen van dit vervoernetwerk het beter inspelen op de vraag van de klant zal zijn, en dit met een optimale inzet van middelen. Er wordt met andere woorden overgegaan van een aanbodperspectief naar een vraaggestuurd perspectief. Een ander voordeel is het feit dat de verschillende vervoersmodi in dit scenario met elkaar samenwerken en dat ze niet los van elkaar opereren. Dit leidt tot een efficiënter gebruik van middelen en minder versnippering van de mobiliteit, want er zal in de toekomst gewerkt worden in regio's en minder op gemeentelijk niveau.

Het openbaar vervoer zal in de toekomst dus deel uitmaken van een systeem waarbij verschillende vervoersvormen gecombineerd worden. De tevredenheid over vervoersmaatschappij De Lijn was de laatste jaren echter nog nooit zo laag. Dit heeft onder meer te maken met een stiptheid die te wensen overlaat. De belangrijkste redenen voor vertragingen bij het openbaar vervoer werden daarom nagegaan en uit de literatuurstudie blijkt dat de meeste vertragingen bij het openbaar vervoer veroorzaakt worden door wegenwerken, congestie of technische storingen.

In het nieuwe gelaagde vervoernetwerk dat tot stand zal komen, worden de onderste drie lagen ingevuld door vervoer op maat en het openbaar vervoer. Een volgende deelonderzoeksvraag trachtte daarom de verschillen tussen een standaard dial-a-ride probleem (DARP), wat enkel van toepassing is op vervoer op maat, en een geïntegreerd DARP, waarbij een combinatie tussen verschillende vervoersvormen gemaakt wordt, na te gaan. Het standaard DARP heeft als doel een verzameling routes met de laagste kost op te stellen die voldoen aan alle vraag, rekening houdend met een aantal servicevereisten. In een geïntegreerd DARP is het daarbij dus mogelijk om het openbaar vervoer te integreren in zo'n standaard DARP. Extra moeilijkheden die daardoor opduiken zijn het feit dat er synchronisatie moet bestaan tussen de rittenplanningen van het openbaar vervoer en de DAR-voertuigen. Andere uitbreidingen ten opzichte van het standaardprobleem zijn het feit dat er nu beperkingen moeten opgenomen worden die verband houden met overstaplocaties enzovoort.

Vervolgens werd nagegaan welke impact vertragingen bij het openbaar vervoer juist hebben op de kosten van DAR-aanbieders en wat de gevolgen ervan zijn voor de gebruikers. Hiervoor werd er in het empirisch gedeelte gekeken naar de impact van vertragingen op drie verschillende variabelen, namelijk de afgelegde afstand door de DAR-voertuigen, de gemiddelde reistijd van de klanten en het percentage van de ritten dat gebruik maakt van het openbaar vervoer. De eerste variabele werd gekozen omdat het de variabele is die geminimaliseerd wordt door het algoritme en omdat dit een maatstaf is voor de operationele kosten van een DAR-aanbieder. De reistijd van een klant werd opgenomen omdat deze niet te lang mag zijn om comfortabel te blijven voor de klant. Dit wordt dan ook aanzien als een belangrijke maatstaf voor de kwaliteit van de service, en aan de hand van de wijzigingen in de reistijd kunnen de gevolgen voor de gebruikers nagegaan worden. Verder was het

ook interessant om na te gaan hoeveel gebruik er nu gemaakt wordt van het openbaar vervoer, wanneer er vertragingen zijn. De impact van vertragingen op deze drie variabelen werd vervolgens bekeken voor verschillende scenario's. Deze waren onder meer opgebouwd uit een verschillende frequentie van het openbaar vervoer, een verschillend aantal spitsreizigers, een maximale tijd die een klant onderweg mag zijn, alsook uit de grootte van de kans op een vertraging. Zo kon de werkelijkheid zo goed mogelijk weergegeven worden. Wat betreft de impact van vertragingen op de afgelegde afstand van de DAR-voertuigen kan besloten worden dat deze afstand terug toeneemt. Hoewel de reistijd van alle reizigers toenam in een scenario met vertragingen, neemt de gemiddelde reistijd af, omdat minder reizigers gebruik maken van het openbaar vervoer, waarmee ze langer onderweg zijn. Het percentage ritten dat gebruik maakt van het openbaar vervoer neemt met andere woorden af in een scenario met vertragingen. Hoewel het afneemt, blijft het nog steeds een redelijk percentage en zakt het niet naar nul. Verder blijkt dat de grootte van de kans op vertragingen niet echt een invloed uitoefent op de resultaten. Deze factor heeft namelijk eenzelfde effect, ongeacht de grootte van de toegestane maximale reistijd, de frequentie van het openbaar vervoer of het aantal spitsreizigers.

In conclusie kan er gesteld worden dat het integreren van het openbaar vervoer in een vraaggestuurd systeem leidt tot een globale efficiëntiewinst, alsook tot een daling in service voor gebruikers door het feit dat overstappen nu mogelijk zijn. Voor de DAR-aanbieders betekent het eveneens een afname van hun operationele kosten, aangezien zij minder kilometers zullen afleggen in een geïntegreerd mobiliteitssysteem. Aangezien vertragingen bij het openbaar vervoer veelvoorkomend zijn, was de centrale onderzoeksvraag van dit onderzoek dan ook welke impact zij nu hebben op de kosten van de DAR-aanbieder. Uit de resultaten blijkt dat vertragingen ervoor zorgen dat er terug een toename plaatsvindt in het totale aantal afgelegde kilometer door de DAR-aanbieder. Dit betekent dat de kosten voor hen terug zullen toenemen ten opzichte van het scenario waarbij er geen vertragingen zijn. Verder bleek wel dat de integratie van de twee systemen bij vertragingen nog steeds voordeliger blijkt voor de DAR-aanbieder, aangezien het aantal afgelegde kilometer lager blijft dan in het niet-geïntegreerde scenario. De winst aan efficiëntie door het integreren van de twee vervoersvormen blijft bestaan, zelfs wanneer er vertragingen zijn.

Er zijn echter wel een aantal randvoorwaarden waaronder deze conclusies gelden. Een voorbeeld hiervan is de structuur van het netwerk. De vraag in deze studie is geclusterd en zoals eerder aangehaald, kunnen de voordelen die de integratie biedt minder interessant zijn wanneer klanten verspreider wonen. Er wordt ook een veronderstelling gemaakt over het aantal klanten dat een verre verplaatsing maakt. Dit kan er eveneens voor zorgen dat integratie minder aantrekkelijk wordt.

4.2 Beperkingen

Een eerste beperking in dit onderzoek is het feit dat dezelfde snelheid verondersteld wordt voor het openbaar vervoer en de DAR-voertuigen, namelijk 60 km per uur, exclusief haltetijd. Dit werd zo gekozen omdat de afstanden van de haltes van het openbaar vervoer wat verder uit elkaar liggen in deze data set. In realiteit kunnen haltes zich echter dichterbij elkaar bevinden en zal er niet altijd gebruik gemaakt worden van dezelfde infrastructuur door de twee vervoersmodi. Het aannemen van eenzelfde snelheid kan daarom leiden tot een vertekend beeld, waar rekening mee gehouden moet worden.

Een andere beperking is het feit dat er in het empirisch gedeelte eenzelfde snelheid wordt verondersteld tijdens de piek- en de daluren. Schilde, Doerner en Hartl (2014) stellen echter dat de snelheid erg afhankelijk is van het moment van de dag. Ze stellen vast dat veel artikels over rittenplanningsproblemen constante reissnelheden veronderstellen doorheen de tijd. Maar, in realiteit verandert deze snelheid door onder meer congestie, slecht weer, ongevallen ... Het aannemen van een constante snelheid voor ieder moment van de dag kan er vervolgens voor zorgen dat rittenplanningen in realiteit falen met betrekking tot de vooropgestelde tijdvensters. Dit zorgt voor een lager niveau van dienstverlening, door eventuele schendingen van tijdvensters en de maximale reistijdfactor, en vaak zijn de reistijden van de reizigers dan ook erg lang. In sommige onderzoeken (Eglese, Maden, & Slater, 2006 in Schilde et al., 2014) worden reistijden als deterministisch aangenomen, en wordt er vervolgens gereageerd op veranderingen in de snelheden door het herberekenen van de *shortest path*. In hun onderzoek beschouwen Schilde et al. (2014) het effect van het benutten van statistische informatie die beschikbaar is over ongevallen voor het dynamische DARP. Uit het onderzoek blijkt dat tijdsafhankelijke reissnelheden tot betere resultaten leiden dan het gebruik van constante snelheden. Het veronderstellen van deze reissnelheden is natuurlijk ook afhankelijk van welk soort openbaar vervoer (bus, tram ...) gebruikt wordt.

Een volgende beperking is dat er in de formulering van Posada et al. (2017) wordt opgenomen dat een halte van het openbaar vervoer het begin- of het eindpunt kan vormen voor de route van een bepaalde reiziger. Dit betekent dat het eerste of laatste gedeelte van een rit niet meer uitgevoerd wordt door een DAR-voertuig omdat een bestemming van een klant, zoals bijvoorbeeld een ziekenhuis, zich bevindt aan een halte van het openbaar vervoer. Dit werd echter zo niet opgenomen in het empirisch gedeelte van deze masterproef. Het is niettemin zeker nuttig om deze optie te beschouwen in verder onderzoek.

Een laatste bemerking is het feit dat werd aangenomen dat 75% van de reizigers zich verplaatst tussen de verschillende *clustering poles*, terwijl 25% een verplaatsing maakt binnen zijn *clustering pole*. Het zou eveneens interessant geweest zijn om deze percentages te variëren, aangezien dit waarschijnlijk een invloed zal hebben op het feit of het openbaar vervoer gebruikt zal worden bij een bepaalde verplaatsing. Wanneer er namelijk een verplaatsing plaatsvindt binnen de *clustering pole* is de kans veel kleiner dat het openbaar vervoer gebruikt zal worden. In realiteit is het ook veel waarschijnlijker dat deze percentages zullen verschillen in verscheidene steden/regio's, afhankelijk van de grootte van de steden in de regio en het feit of er veel werkgelegenheid en maatschappelijke diensten aanwezig zijn in de regio. Verder werd ook de structuur van het openbaarvervoernetwerk

niet gevarieerd. Een andere situering van de haltes zou een invloed kunnen uitoefenen op hoe vaak het openbaar vervoer gebruikt wordt en het zou met andere woorden ook interessant geweest zijn om te onderzoeken wat voor effect dit heeft.

4.3 Aanbevelingen verder onderzoek

In deze masterproef werd er als vorm van het openbaar vervoer gekozen voor de bus. Wanneer er echter uitgegaan wordt van een andere vorm van openbaar vervoer zoals bijvoorbeeld de tram of de trein, kan dit tot beperkingen leiden wat betreft het gebruik van de spoorinfrastructuur. Deze transportmodi hebben namelijk te kampen met beperkte rijpaden. Om hier een antwoord op te bieden kan er gebruik gemaakt worden van prioriteitsregels. Een voorbeeld hiervan is het geven van voorrang aan treinen of trams die stipt rijden. Dit vergt natuurlijk meer gesofisticeerde schema's. Onder meer Schöbel (2009), D'Ariano, Pacciarelli en Pranzo (2007) en Törnquist (2008) hebben al onderzoek verricht naar het omgaan met deze capaciteitsbeperkingen en prioriteitsregels. Het vormt een interessante piste hier in toekomstig onderzoek op verder te gaan, aangezien er in basisbereikbaarheid verschillende vormen van vervoer gecombineerd worden, waarbij tram en trein ook tot de mogelijkheden behoren. Door de beperkte infrastructuur waar deze vervoersvormen mee te kampen hebben, zouden vertragingen bij deze vervoersmodi een andere impact kunnen uitoefenen op de kost van de DAR-aanbieders en op de algemene efficiëntie van de integratie.

In de huidige oplossing was het slechts mogelijk één keer over te stappen, namelijk van een DAR-voertuig op de bus en van de bus op een DAR-voertuig, maar bijvoorbeeld niet tussen verschillende buslijnen onderling. Het kan interessant zijn om te kijken wat de effecten zijn wanneer toegestaan wordt om meermaals over te stappen en dit eventueel op verschillende modi. Dit zal vooral van toepassing zijn wanneer de afstanden die afgelegd worden, groter zijn dan deze tot nu opgenomen in de data set. De gebruiksvriendelijkheid van meerdere overstappen zal dan eveneens onderzocht moeten worden, aangezien het maken van meerdere overstappen vaak als minder comfortabel wordt beschouwd door reizigers. Het kan een interessante denkspoor vormen voor verder onderzoek, aangezien de manier waarop men zich verplaatst zal moeten veranderen in de toekomst en een combinatie van verschillende modi meer en meer zal worden aangeraden. Dit werd bijvoorbeeld al gezien in de literatuurstudie door het in voege treden van basisbereikbaarheid, waar de focus meer zal liggen op het combineren van vervoersmodi. Wanneer meerdere overstappen worden toegestaan, zal er in de probleemformulering die dan wordt opgesteld bijvoorbeeld een beperking opgenomen kunnen worden die een maximaal aantal oplegt met betrekking tot het aantal overstappen dat een klant maakt om zo toch een bepaald serviceniveau voor de klant te verzekeren.

Het aangehaalde *delay management problem* (DMP) in de literatuurstudie staat los van het praktijkgedeelte. De vertragingen bij het openbaar vervoer zijn namelijk een input voor het probleem in het empirisch gedeelte van deze masterproef. In het DMP is het echter een beslissing om een voertuig te laten wachten of niet. Hierbij gaat het zowel over de beslissing of aansluitingen tussen vertraagde OV-lijnen verzekerd worden, als over de beslissing of een DAR-voertuig blijft wachten op een reiziger die met een plots vertraagde OV-rit aankomt. Dit kan dus nuttig zijn voor verder onderzoek, zeker wanneer er gewerkt zal worden met dynamische vertragingen. Vertragingen zijn

hierbij niet op voorhand gekend en de beslissing om een voertuig te laten wachten zal een belangrijke beslissing worden. Het onderwerp werd al onderzocht door onder meer Schachtebeck (2009).

Een scenario zonder vertragingen werd hier vergeleken met een scenario met statische vertragingen. In zo'n scenario worden de vertragingen echter op voorhand bepaald door middel van een kansverdeling. In de praktijk zijn vertragingen echter niet op voorhand gekend en raken deze pas in reële tijd bekend. Een meer realistische benadering voor de praktijk zou dan ook het implementeren van dynamische vertragingen inhouden. Hoe deze kunnen worden opgenomen in het standaard DARP, wordt beschreven door Fu (2002). Het kan dus zeer nuttig zijn voor verder onderzoek om na te gaan wat het effect is van het opnemen van dynamische vertragingen op de kost van de DAR-aanbieders en of deze effecten sterk verschillen van deze bij statische vertragingen. Bij een vertraging die op voorhand gekend is, kan het algoritme hier namelijk rekening mee houden en kan het bijvoorbeeld reizigers aan een bushalte afzetten nadat de bus normaal gepasseerd zou zijn. Met de kennis die er al bestaat over de vertraging, weet het algoritme dat deze persoon toch nog mee kan op de bus, aangezien deze te laat zal aankomen.

Uit de literatuurstudie blijkt dat een reiziger een minuut die hij spendeert op een voertuig als aangenamer bestempelt dan een minuut die hij spendeert wachtend aan een halte (Litman, 2009 in Litman, 2017). Een mogelijke extra beperking die vervolgens nog opgenomen kan worden in de probleemformulering is daarom een maximale wachttijd aan een bushalte. Dit zou immers een extra servicevereiste kunnen zijn van klanten die momenteel nog niet werd opgenomen in het algoritme.

Verder werd er ook niet nagegaan of een klant bereid is om te betalen voor een vervoerscombinatie waarbij hij niet zelf kan bepalen of hij zal moeten overstappen. Dit kan opgenomen worden in de doelfunctie door bijvoorbeeld een factor toe te voegen waaraan een waarde toegekend kan worden wanneer een reiziger niet moet overstappen, waarbij dan vervolgens de volledige winst van de DAR-aanbieder geoptimaliseerd wordt, in plaats van enkel de operationele kosten te minimaliseren.

4.4 Beleidsaanbevelingen

Zoals in de literatuurstudie aangehaald, is de belastingdotatie van De Lijn erg toegenomen de laatste jaren. Men wil hier als overheid dan ook iets aan doen, door nauwelijks gebruikte lijnen af te schaffen en door het efficiënter maken van het openbaar vervoer. In rurale gebieden wil men meer werken met vervoer op maat en vooral in stedelijke gebieden wil men een goed openbaarvervoernetwerk behouden. De bekomen resultaten tonen aan dat een minimumaanbod aan OV-lijnen al zorgt voor een efficiëntiewinst in een geïntegreerd mobiliteitssysteem. Afhankelijk van welke financiering voor het vervoer op maat voorzien wordt, kan het huidige voorstel om DAR-diensten vooral te gebruiken in rurale gebieden samen met een aanvullend net van openbaar vervoer, dus zeker nuttig zijn, zelfs bij een beperktere dienstregeling. Het zou voor beleidsmakers daarom zeker nuttig kunnen zijn na te gaan wat een ideale frequentie van het openbaar vervoer zou zijn om zo de belastingdotatie naar beneden te halen. Bij de bepaling hiervan moet er wel rekening gehouden worden met de kosten van het vervoer op maat en de vervoersstromen van het openbaar vervoer op zich.

Het plannen en ontwerpen van een kost- en service-efficiënt openbaarvervoernetwerk is noodzakelijk voor het verbeteren van de competitiviteit ervan (Kepaptsoglou & Karlaftis, 2009). Het *transit route*

network design problem beschrijft hoe zo'n netwerk het best opgesteld wordt. Het focust op de optimalisatie van een aantal doelen met betrekking tot de efficiëntie van het openbaar vervoer, waarbij er beperkingen gelden met betrekking tot het aantal en de lengtes van de routes, de frequenties enzovoort. Eerst zullen de routes ontworpen worden, waarna de frequenties bepaald worden, de dienstregelingen ontwikkeld en als laatste worden de chauffeurs en het materiaal ingepland. De routes worden bepaald aan de hand van de *flow* van de reizigers. Geanticiperde overstapplaatsen en de *service coverage* bepalen mee de structuur van het netwerk. De frequenties worden berekend aan de hand van de verwachte volumes van reizigers. Deze worden ofwel empirisch geschat, ofwel bepaald door *assignment techniques*. Bij het opstellen wordt er telkens rekening gehouden met een minimum en een maximum toegestane frequentie zodat de veiligheid en tolereerbare wachttijden aan haltes gegarandeerd worden. Vaak is het bepalen van de frequenties ook gewoon gebaseerd op het oordeel van de planners of op basis van ervaring. Naar het efficiënt bepalen van frequenties werd ook onderzoek gedaan door onder meer Furth en Wilson (1981 in Ceder en Wilson, 1986), Koutsopoulos en Wilson (1983 in Ceder en Wilson, 1986) en Ceder (1983 in Ceder en Wilson, 1986).

Het doel bij het opstellen van het netwerk is het minimaliseren van de kosten. Besparingen kunnen echter leiden tot een vermindering van de aangeboden kwaliteit van de dienst. Volgens Ceder en Wilson (1986) wordt als doel bij het ontwerpen van het model vaak het minimaliseren van de tijd of de algemene kost (de gebruikers- en systeemkost) of het maximaliseren van het consumentensurplus als doel vooropgesteld. Met dit in gedachten worden vervolgens routes opgesteld. De configuratie van de route houdt de selectie en de verbetering van de optimale routes in, samen met de bepaling van de frequenties. Dit wordt bepaald aan de hand van een iteratief proces met behulp van een zoekalgoritme of metaheuristieken.

Ceder en Wilson (1986) stellen dat er eveneens veel externe en operationele factoren zijn die te maken hebben met het ontwerp van een busnetwerk, zoals bijvoorbeeld financiële, socio-economische en politieke factoren. Deze nieuwe niveaus van complexiteit willen zij toevoegen aan het opstellen van de route. Zij bekijken het netwerk vanuit twee verschillende standpunten, zowel vanuit het standpunt van de reiziger, als dat van de operator. Zij beweren dat mensen in het algemeen een busroutenetwerk goed vinden wanneer dit niet te veel routes bevat, geen te lange of cirkelvormige routes bevat of wanneer er niet veel keren moet worden overgestapt. Voor de operator is een goed netwerk eentje dat als voordelig gezien wordt door reizigers en dat niet te veel middelen vereist door gecompliceerde dienstregelingen.

Aan al deze bestaande modellen voor het bepalen van een goed openbaarvervoernetwerk kan vervolgens voor- en natransport toegevoegd worden, zodat vervoer op maat mee geïntegreerd wordt. Deze integratie is namelijk van belang bij het bepalen van een optimaal openbaarvervoernetwerk en bij het bepalen van de frequentie van de dienstregeling, omdat de resultaten anders kunnen zijn wanneer de vervoersvormen samen bekeken worden.

4.5 Aanbevelingen voor DAR-aanbieders

Een mogelijke opportuniteit voor DAR-aanbieders bij de integratie van het openbaar vervoer met hun diensten, zelfs wanneer er vertragingen zijn, is het feit dat wanneer klanten gebruik maken van het openbaar vervoer voor een gedeelte van hun rit, de routes die de DAR-aanbieders uitvoeren, meer geclusterd zullen zijn. Hierdoor kunnen chauffeurs efficiënter ingezet worden en deze clustering kan het ook makkelijker maken om mensen samen te vervoeren, wanneer dit systeem op een grote schaal wordt uitgevoerd. Omgerekend per klant/chauffeur wordt de exploitatie dus goedkoper. Door de vele korte afstanden die in zo'n scenario waarschijnlijker zijn, kunnen DAR-aanbieders bijvoorbeeld ook hun wagenpark aanpassen naar wagens die voordeliger zijn voor het afleggen van deze afstanden.

Een ander voordeel voor DAR-aanbieders is het feit dat de integratie met het openbaar vervoer leidt tot een kostenvoordeel. Het aantal kilometer dat een DAR-aanbieder minder moet afleggen door de integratie van het openbaar vervoer kan namelijk uitgedrukt worden in monetaire termen. Elke gereden kilometer wordt uitgedrukt in een geldbedrag. Hoe meer men rijdt, hoe groter namelijk de onderhoudskost, de brandstofkost en de loonkost zijn voor de aanbieder. Dit zijn allemaal variabele kosten die samenhangen met het aantal gereden kilometer. De aankoop van een wagen is ook een kost voor de DAR-aanbieder en hoewel deze ook deels afhankelijk is van het aantal gereden kilometer, wordt dit niet in beschouwing genomen hier, aangezien het doel in het empirisch gedeelte het minimaliseren van de operationele kosten was. De kost per kilometer wordt geschat op 0,30 euro voor een gewone personenwagen. Dit bedrag werd berekend aan de hand van een simulatie gemaakt door Taxistop, waarbij er uitgegaan werd van doorsnee onderhoudskosten en een doorsnee verbruik. In deze kost zit dus zowel de onderhoudskost als de brandstofkost vervat. Verder is er ook nog een loonkost. De gemiddelde arbeidskost in België lag in 2018 op 39,70 euro per uur (Haeck, 2019). Bij de veronderstelde snelheid van 60 km/u in het empirisch gedeelte komt dit neer op een kost van 0,66 euro per kilometer. Dit is echter een zeer ruwe benadering aangezien er op deze manier enkel rekening gehouden wordt met wanneer een chauffeur werkelijk aan het rijden is. De tijd die hij moet wachten aan bijvoorbeeld een overstapplaats wordt hier niet mee in rekening genomen. Wanneer er echter gerekend wordt met deze twee bedragen, komt de totale kost uiteindelijk neer op 0,96 euro per km. Dit is echter een grove bepaling van de kost. In werkelijkheid kan deze hoger liggen, omwille van hogere lonen die een werkgever zou uitkeren, een snelheid die lager kan liggen wanneer er veel in stedelijk gebied gereden wordt, hogere onderhoudskosten ...

De integratie van het openbaar vervoer, in een scenario zonder vertragingen, zorgt voor een besparing van 299,16 gereden kilometer voor de DAR-aanbieder. Aan een kost van 0,96 euro per kilometer komt dit neer op een kostenbesparing van 287,19 euro voor een DAR-aanbieder. Dit is een besparing op dagelijkse basis. Deze besparing verkleint echter wel wanneer er sprake is van vertragingen bij het openbaar vervoer. In totaal leidt de integratie, in een realistische setting met vertragingen, nog steeds tot een kostenvoordeel van 226,96 euro voor een DAR-aanbieder. Dit is echter een ruwe schatting. In werkelijkheid kan dit bedrag anders zijn, omwille van mogelijke langere wachttijden voor chauffeurs in een scenario met vertragingen, een andere snelheid van het openbaar vervoer ...

Een bijkomend voordeel dat hier buiten beschouwing werd gelaten, is het feit dat wanneer er minder gereden wordt, er eventueel ook minder nood is aan voertuigen. De kost van het aankopen van extra voertuigen kan dus eventueel in de toekomst nog uitgespaard worden. Een voertuigminimalisatie zou bijvoorbeeld als doelfunctie opgenomen kunnen worden. Om de dure kosten die bij de aankoop van een voertuig horen te vermijden, zou deze minimalisatie dan een primaire doelfunctie kunnen zijn, waarna vervolgens de operationele kosten geminimaliseerd kunnen worden in een volgende doelfunctie.

4.6 Haalbaarheid basisbereikbaarheid

Hoewel basisbereikbaarheid vanaf 2020 in voege treedt, bestaat er nog veel onduidelijkheid over. In eerste instantie kunnen er bemerkingen gemaakt worden bij de financiering ervan en bestaat er onzekerheid over de tarieven die zullen gelden. In hun advies op het voorontwerp betreffende basisbereikbaarheid stelt de mobiliteitsraad van Vlaanderen (MORA) dat er voldoende middelen moeten worden vrijgemaakt om basisbereikbaarheid te kunnen realiseren zodat in elke regio een goed gelaagd vervoernetwerk gerealiseerd kan worden (MORA, 2018). In het begrotingsprogramma wordt 1,4 miljard euro voorzien (Ontwerp van decreet basisbereikbaarheid, 14 januari 2019). Dit zou het mogelijk moeten maken voldoende te investeren in infrastructuur en rollend materieel. Met synergiewinsten en een optimale gelaagdheid wordt vervolgens getracht een kwalitatiever aanbod te realiseren. Er bestaat echter onzekerheid over het feit of dit bedrag groot genoeg is. De betaalbaarheid van het vervoersaanbod moet namelijk gegarandeerd blijven voor de gebruiker. Daarnaast zal er ingezet moeten worden op transparantie en eenduidigheid in tariefstructuren en gezorgd worden voor één vervoersbewijs voor het volledige systeem. Het ontwerp van decreet bepaalt nu immers dat de vervoerregioraad de tarieven mag bepalen voor het vervoer op maat. Dit staat een maximale tarief- en ticketintegratie in de weg. Het zou daarom beter zijn dat de Vlaamse Regering dit zou coördineren voor alle netten. In het huidige ontwerpdecreet is dit enkel mogelijk voor het kernnet en aanvullend net.

Het gelaagde netwerk werd eveneens nog niet uitgetest, waardoor men moeilijk kan inschatten wat mogelijk is met het huidige budget. Er rijzen verschillende vragen zoals bijvoorbeeld de vraag of een versterking van bepaalde OV-lijnen wel mogelijk zal zijn. Er is daarnaast ook nood aan een goed aanbod van het voor- en natransport. De twee vervoersvormen zullen goed op elkaar afgestemd moeten worden. Het opstarten van nieuwe soorten vervoer op maat is echter kostelijk. Er kan overwogen worden een opstartsubsidie te geven, zodat op termijn kan blijken of de diensten in staat zijn zichzelf te financieren.

Bovendien zijn de gevolgen van dit nieuwe beleid eveneens nog zeer onduidelijk. Er werden wel proefregio's opgericht, maar daaruit kwam voorlopig weinig nieuwe informatie naar boven. In de proefregio's werd de focus vooral gelegd op regionale bestemmingen zoals scholen, ziekenhuizen en kmo-zones. Lokale verbindingen en bestemmingen (zoals het gemeentehuis, een woonzorgcentrum of de sporthal) kwamen amper aan bod. Een enquête georganiseerd door Landelijke Gilden vond nochtans dat deze verplaatsingen net zeer belangrijk zijn voor het doen slagen van het vraagafhankelijk vervoer op maat ("Wordt basisbereikbaarheid een maat voor niets?," 2019). Zij stellen ook dat OV-reizigers gevoeliger zijn aan de halteafstand dan aan de frequentie van het

openbaar vervoer. Daarnaast is het succes van het openbaar vervoer ook afhankelijk van het gevoerde beleid. De fiets zou bijvoorbeeld naar voren geschoven kunnen worden voor het voor- en natransport van het openbaar vervoer. Dit zou kunnen als de haltes en stations een multimodaal knooppunt worden. Maar ook hier bestaat nog veel onduidelijkheid over.

Hoewel er al een aantal zaken geregeld en beslist zijn, zullen er zeker nog een aantal beslissingen moeten volgen om een vlotte overgang naar basisbereikbaarheid mogelijk te maken.

5. Referenties

- Carosi, S., Gualandi, S., Malucelli, F., & Tresoldi, E. (2015). Delay management in public transportation: service regularity issues and crew re-scheduling. *Transportation Research Procedia*, 10, 483-492.
- Ceder, A., & Wilson, N. H. (1986). Bus network design. *Transportation Research Part B: Methodological*, 20(4), 331-344.
- Cordeau, J.-F. (2006). A branch-and-cut algorithm for the dial-a-ride problem. *Operations Research*, 54(3), 573-586.
- Cordeau, J.-F., & Laporte, G. (2003). A tabu search heuristic for the static multi-vehicle dial-a-ride problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 37(6), 579-594.
- Cordeau, J.-F., & Laporte, G. (2007). The dial-a-ride problem: models and algorithms. *Annals of Operations Research*, 153(1), 29-46.
- D'Ariano, A., Pacciarelli, D., & Pranzo, M. (2007). A branch and bound algorithm for scheduling trains in a railway network. *European Journal of Operational Research*, 183(2), 643-657.
- De Ceuster, G. (2010). Trans-European transport network planning methodology. Opgevraagd op 7 mei, 2019, via https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/themes/infrastructure/studies/doc/2010_2010_ten-t_planning_methodology.pdf.
- Drexler, M. (2012). Synchronization in vehicle routing—a survey of VRPs with multiple synchronization constraints. *Transportation Science*, 46(3), 297-316.
- Effecten - stiptheid De Lijn. (z.j.). Opgevraagd op 25 maart, 2019, via <http://www.mobiliteitsraad.be/mora/thema/kerncijfers/mobiliteit-in-haar-omgeving/effecten-stiptheid-lijn>.
- Fu, L. (2002). Scheduling dial-a-ride paratransit under time-varying, stochastic congestion. *Transportation Research Part B: Methodological*, 36(6), 485-506.
- Garaix, T., Artigues, C., Feillet, D., & Josselin, D. (2011). Optimization of occupancy rate in dial-a-ride problems via linear fractional column generation. *Computers & Operations Research*, 38(10), 1435-1442.
- Gershenson, C., & Pineda, L. A. (2009). Why does public transport not arrive on time? The pervasiveness of equal headway instability. *PLoS one*, 4(10), e7292.
- Ginkel, A., & Schöbel, A. (2007). To wait or not to wait? The bicriteria delay management problem in public transportation. *Transportation Science*, 41(4), 527-538.
- Gschwind, T., & Irnich, S. (2014). Effective handling of dynamic time windows and its application to solving the dial-a-ride problem. *Transportation Science*, 49(2), 335-354.
- Haeck, B. (2019). België haalt nog altijd brons voor loonkosten. *De Tijd*, Opgevraagd op 13 mei, 2019, via <https://www.tijd.be/politiek-economie/belgie/federaal/belgie-haalt-nog-altijd-brons-voor-loonkosten/10116399.html>.
- Heilporn, G., De Giovanni, L., & Labbé, M. (2008). Optimization models for the single delay management problem in public transportation. *European Journal of Operational Research*, 189(3), 762-774.

- Hoornaert, D. S. (2019). Verkeersindicatoren snelwegen Vlaanderen 2018.
- Hunt, R. (2013). Bus passengers' experience of delays and disruption. *Passenger Focus*.
- Immers, B., & Corman, F. (2011). Openbaar vervoer H01I6A Verkeerskunde basis. Opgevraagd op 6 mei, 2019, via <https://www.mech.kuleuven.be/cib/verkeer/dwn/cursusteksten-voor-2011/les-2017-openbaar-vervoer-2011.pdf>.
- Ingels, J. (2012). Integere programmering voor cyclische personeelsplanning (Masterproef). Opgevraagd op 12 maart, 2019, via https://lib.ugent.be/fulltxt/RUG2001/2001/2893/2355/RUG2001-001893355_001892012_001890001_AC.pdf.
- Inspiratie voor vraaggestuurd vervoer uit Denemarken. Mobiliteitsbrief 174 - Basisbereikbaarheid. (2016). Opgevraagd op 22 november, 2018, via <https://www.mobielvlaanderen.be/overheden/artikel.php?nav=2010&mbnr=2174&id=1972>.
- Kepaptsoglou, K., & Karlaftis, M. (2009). Transit route network design problem. *Journal of transportation engineering*, 135(8), 491-505.
- Litman, T. (2017). Evaluating public transit benefits and costs: Best practices guidebook.
- Lynott, J. (2019). FlexDanmark Optimizes Scandinavian Software Solution to Deliver Efficient, High Quality Transportation to Its Citizens. *AARP International: The Journal*, 12, 52-57. doi:<https://doi.org/10.26419/int.00036.015>.
- Masson, R., Lehuédé, F., & Péton, O. (2014). The dial-a-ride problem with transfers. *Computers & Operations Research*, 41, 12-23.
- Met basisbereikbaarheid naar betere mobiliteit. (2018). Opgevraagd op 2 november, 2018, via <https://mobielvlaanderen.be/persberichten/artikel.php?a=2011&id=2968>.
- Molenbruch, Y., Braekers, K., & Caris, A. (2017a). Benefits of horizontal cooperation in dial-a-ride services. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 107, 97-119.
- Molenbruch, Y., Braekers, K., & Caris, A. (2017b). Typology and literature review for dial-a-ride problems. *Annals of Operations Research*, 259(1/2), 295-325. doi:10.1007/s10479-017-2525-0.
- MORA. (2018). Advies - Voorontwerp van decreet betreffende de basisbereikbaarheid. Opgevraagd op 2 mei, 2019, via <https://www.basisbereikbaarheid.be/docs/MORA-advies-Basisbereikbaarheid.pdf>.
- Nagy, E., & Csiszár, C. (2015). Analysis of delay causes in railway passenger transportation. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 43(2), 73-80.
- Ontwerp van decreet betreffende de basisbereikbaarheid. (2019). *Parl.St. VI.Parl.*, 2018-2019, stuk 1805 - nr. 0001.
- Parragh, S. N., Cordeau, J.-F., Doerner, K. F., & Hartl, R. F. (2012). Models and algorithms for the heterogeneous dial-a-ride problem with driver-related constraints. *OR spectrum*, 34(3), 593-633.
- Parragh, S. N., Doerner, K. F., & Hartl, R. F. (2008). A survey on pickup and delivery problems. *Journal für Betriebswirtschaft*, 58(1), 21-51.
- Pisinger, D., & Røpke, S. (2010). Large Neighborhood Search. *Handbook of Metaheuristics* (pp. 399-419): Springer.

- Poppelmonde, J. (2018, 26 april). Op De Lijn is het altijd een beetje wachten. *De Standaard*, Opgevraagd op 5 oktober, 2018, via http://www.standaard.be/cnt/dmf20180425_03483082.
- Posada, M., Andersson, H., & Häll, C. H. (2017). The integrated dial-a-ride problem with timetabled fixed route service. *Public Transport*, 9(1-2), 217-241.
- Schachtebeck, M. (2009). *Delay management in public transportation: Capacities, robustness, and integration*. Citeseer.
- Schilde, M., Doerner, K. F., & Hartl, R. F. (2014). Integrating stochastic time-dependent travel speed in solution methods for the dynamic dial-a-ride problem. *European Journal of Operational Research*, 238(1), 18-30.
- Schöbel, A. (2009). Capacity constraints in delay management. *Public Transport*, 1(2), 135-154.
- Silver, E. A. (2004). An overview of heuristic solution methods. *Journal of the Operational Research Society*, 55(9), 936-956.
- Törnquist, J. (2008). *Dynamic railway traffic management during disturbances: Focus on the complexity imposed by deregulation*. Paper presented at the ITSWC-Intelligent Transportation System World Congress.
- Weyts, B. (2016). Conceptnota aan de Vlaamse Regering. Betreft: Met Basisbereikbaarheid naar een efficiënt en aantrekkelijk vervoersmodel in Vlaanderen dat optimaal tegemoet komt aan de globale en lokale vervoersvraag.
- Wordt basisbereikbaarheid een maat voor niets? (2019). Opgevraagd op 13 mei, 2019, via <https://www.landelijkegilden.be/informer/en/actualiteit/wordt-basisbereikbaarheid-een-maat-voor-niets>.

6. Bijlagen

Bijlage 1. Mathematische formulering van de probleemformulering van het geïntegreerd DARP

Verklaring van de sets

G	set van overstaplocaties
N	set van alle knooppunten
A	set van alle verbindingen tussen de knooppunten
N^P	set van alle oppikknooppunten
N^D	set van alle afzetknooppunten
N^G	set van alle overstapknooppunten
N^P_g	subset van oppikknooppunten direct verbonden met overstaplocatie g
N^D_g	subset van afzetknooppunten direct verbonden met overstaplocatie g
R	set van verzoeken
V	set van DAR-voertuigklassen
K_v	set van voertuigen van klasse v
S	set van middelen
D_{ij}	set van vertrekken tussen de overstaplocaties i en j

Verklaring van de variabelen

x_{imjnvk}	= 1 als voertuig k van klasse v reist van knooppunt (i,m) naar knooppunt (j,n) = 0 anders
y_{imjnr}	= 1 als verzoek r reist met een DAR-voertuig van knooppunt (i,m) naar knooppunt (j,n) = 0 anders
z_{imjndr}	= 1 als de vaste route vertrek d (i.e. met het openbaar vervoer) gebruikt wordt van knooppunt (i,m) naar knooppunt (j,n) door verzoek r = 0 anders
w_{imjnr}	= 1 als verzoek r wandelt van knooppunt (i,m) naar knooppunt (j,n) = 0 anders
a_{im}	= 1 als het artificiële overstapknooppunt (i,m) bezocht wordt

= 0 anders

t_{im} tijddienst op knooppunt (i,m) start

Verklaring van de parameters

\underline{T}_i vroegste start van de dienst op locatie $i \in N^P \cup N^D$

\bar{T}_i laatste start van de dienst op locatie $i \in N^P \cup N^D$

B_r maximale reisduur van verzoek r

C_{ijv} reiskost geassocieerd met reizen tussen locaties i en j met voertuigklasse v

T_{ijv} reistijd tussen locatie i en j met voertuigklasse v

L_{rs} lading van verzoek r m.b.t. middel s

Q_{vs} capaciteit van voertuigklasse v m.b.t. middel s

T_{ijd}^D vertrektijd van vertrek d van locatie i naar locatie j

T_{ijd}^A aankomsttijd op locatie j horend bij het vertrek d van locatie i

C_{ijdr} kost geassocieerd met vertrek d tussen locaties i en j voor verzoek r

$F_{ir} = 1$ als knooppunt (i,1) het oppikknooppunt is van verzoek r

= -1 als knooppunt (i,1) het afzetknooppunt is van verzoek r

= 0 anders

M groot positief getal

Formulering

$$\min \sum_{(i,m) \in N} \sum_{(j,n) \in N} \sum_{v \in V} \sum_{k \in K_v} C_{ijv} * x_{imjnvk} + \sum_{(i,m) \in N^G} \sum_{(j,n) \in N^G} \sum_{d \in D_{ij}} \sum_{r \in R} C_{ijdr} * z_{imjndr} \quad (1)$$

onderhevig aan volgende beperkingen:

$$\sum_{(j,n) \in N} \sum_{v \in V} \sum_{k \in K_v} x_{i1jnvk} = 1, (i,1) \in N^P \cup N^D \setminus N^P_g \cup N^D_g : g \in G \quad (2)$$

$$\sum_{(j,n) \in N} x_{01jnvk} = 1, v \in V, k \in K_v \quad (3)$$

$$\sum_{(j,n) \in N} x_{jnimvk} - \sum_{(j,n) \in N} x_{imjnvk} = 0, (i,m) \in N^P \cup N^D \cup N^G, v \in V, k \in K_v \quad (4)$$

$$\sum_{(i,m) \in N} x_{im2\bar{r}+1,1vk} = 1, v \in V, k \in K_v \quad (5)$$

$$\sum_{(j,n) \in N^G} w_{i1jnr} - \sum_{(j,n) \in N^G} w_{jni1r} + \sum_{(j,n) \in N} y_{i1jnr} - \sum_{(j,n) \in N} y_{jni1r} = F_{ir}, (i,1) \in N^P \cup N^D, r \in R \quad (6)$$

$$\sum_{(j,1) \in N^P} w_{imj1r} - \sum_{(j,1) \in N^P} w_{j1imr} + \sum_{(j,n) \in N^G} \sum_{d \in D_{ij}} z_{imjndr} - \sum_{(j,n) \in N^G} \sum_{d \in D_{ij}} z_{jnimdr} + \sum_{(j,n) \in N} y_{imjnr} - \sum_{(j,n) \in N} y_{jnimr} = 0, (i,m) \in N^G, r \in R \quad (7)$$

$$w_{i1jni} - \sum_{(k,m) \in N^G} \sum_{d \in D_{ij}} z_{jnkmdi} = 0, (j,n) \in N^G, (i,1) \in N^P_j \quad (8)$$

$$\sum_{r \in R} L_{rs} y_{imjnr} - \sum_{v \in V} \sum_{k \in K_v} Q_{vs} x_{imjnvk} \leq 0, (i,m) \in N, (j,n) \in N, s \in S \quad (9)$$

$$t_{jn} - T_{0jv} + M(1 - \sum_{k \in K_v} x_{01jnvk}) \geq 0, (j,n) \in N, v \in V \quad (10)$$

$$t_{jn} - t_{im} - T_{ijv} + M(1 - \sum_{k \in K_v} x_{imjnvk}) \geq 0, (i,m) \in N, (j,n) \in N, v \in V \quad (11)$$

$$t_{j1} - t_{im} + M(1 - w_{imj1,j-\bar{r}}) \geq 0, (i,m) \in N^G, (j,1) \in N^D_i \quad (12)$$

$$t_{jn} - t_{i1} + M(1 - w_{i1jni}) \geq 0, (j,n) \in N^G, (i,1) \in N^P_j \quad (13)$$

$$M + \sum_{(j,n) \in N^G} \sum_{d \in D_{ij}} (T_{ijd}^D - M) * z_{imjndr} - t_{im} \geq 0, (i,m) \in N^G, r \in R \quad (14)$$

$$t_{jn} + \sum_{(i,m) \in N^G} \sum_{d \in D_{ij}} T_{ijd}^A * z_{imjnd} \geq 0, (j,n) \in N^G, r \in R \quad (15)$$

$$t_{im} - t_{i,m+1} \leq 0, i \in G, (i,m) \in N^G_i \quad (16)$$

$$\underline{T}_j \leq t_{i1} \leq \bar{T}_l, (i,1) \in N^P \cup N^D \quad (17)$$

$$t_{\bar{r}+i,1} - t_{i1} \leq B_i, (i,1) \in N^P \quad (18)$$

$$Ma_{im} \geq \sum_{(j,n) \in N^G} \sum_{d \in D_{ij}} z_{imjndr} + \sum_{(j,n) \in N^G} \sum_{d \in D_{ij}} z_{jnimdr}, (i,m) \in N^G, r \in R \quad (19)$$

$$a_{im} \leq \sum_{(j,n) \in N^G} \sum_{d \in D_{ij}} z_{imjndr} + \sum_{(j,n) \in N^G} \sum_{d \in D_{ij}} z_{jnimdr}, (i,m) \in N^G, r \in R \quad (20)$$

$$a_{i,m+1} - a_{i,m} \leq 0, i \in G, (i,m) \in N^G_i \quad (21)$$

$$x_{imjnvk} \in [0,1], (i,m) \in N, (j,n) \in N, v \in V, k \in K_v \quad (22)$$

$$y_{imjnr} \in [0,1], (i,m) \in N, (j,n) \in N, r \in R \quad (23)$$

$$w_{i1jnr} \in [0,1], j \in G, (i,1) \in N^P_j, (j,n) \in N^G_j, r \in R \quad (24)$$

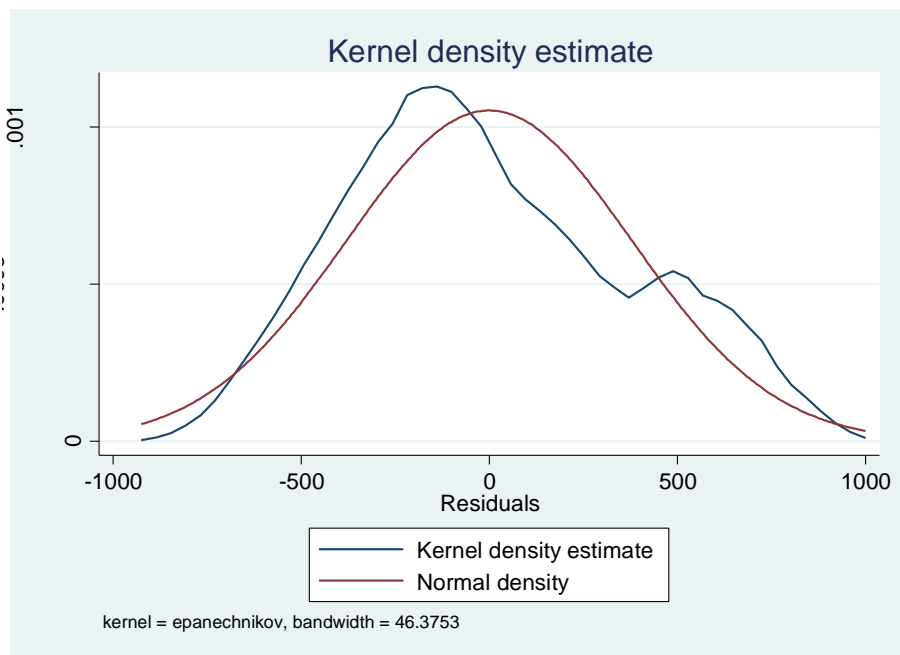
$$w_{imj1r} \in [0,1], j \in G, (j,1) \in N^D_i, (i,m) \in N^G_i, r \in R \quad (25)$$

$$z_{imjndr} \in [0,1], ij \in G, (i,m) \in N^G_i, (j,n) \in N^G_j, d \in D_{ij} \quad (26)$$

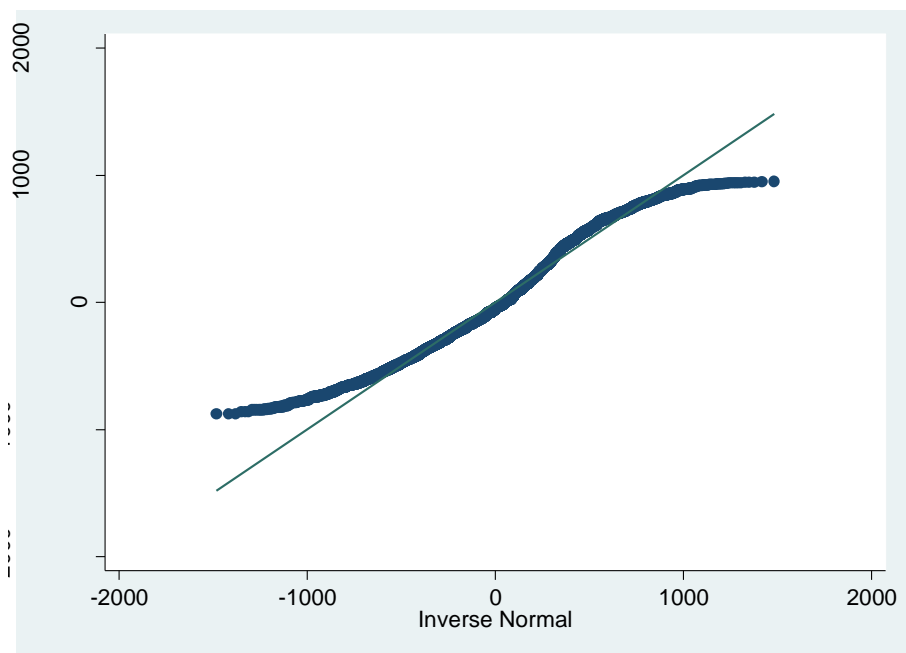
$$a_{im} \in [0,1], i \in G, (i,m) \in N^G_i \quad (27)$$

$$t_{im} \geq 0, (i,m) \in N \quad (28)$$

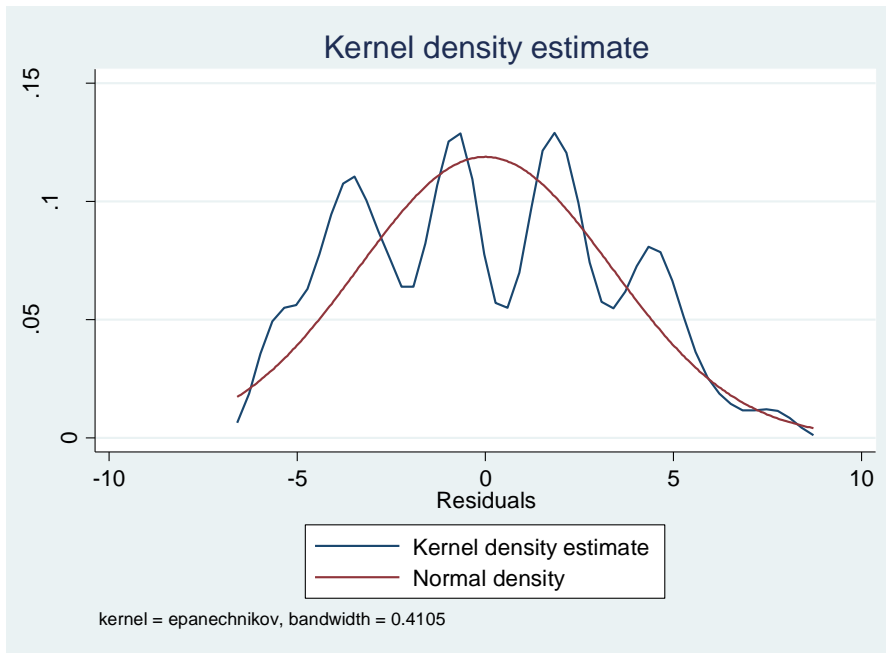
Bijlage 2. Kernel density plots en Q-Q plots voor het globaal scenario



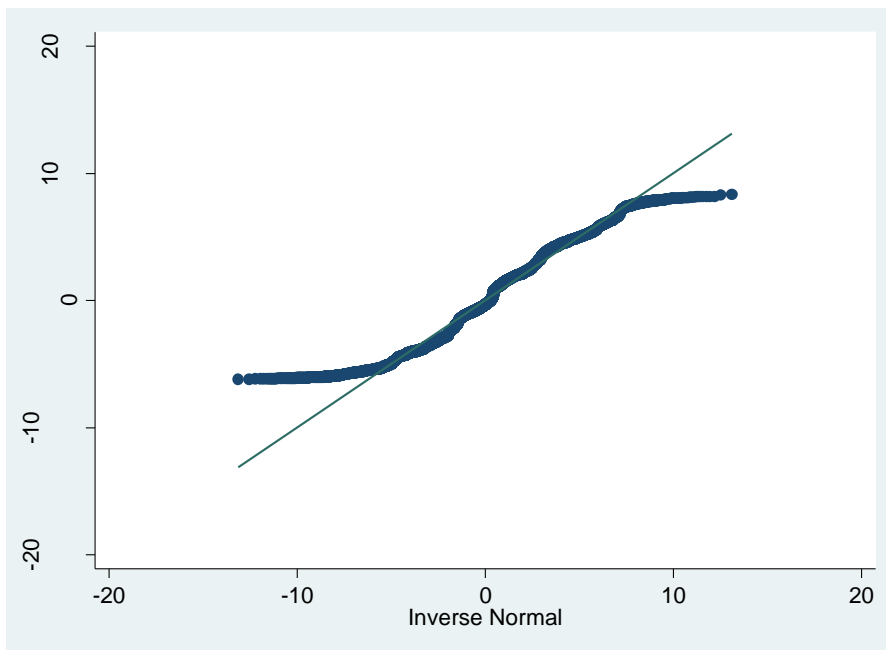
Figuur 19. Kernel density plot van residuals globaal scenario voor afstand DAR-voertuigen



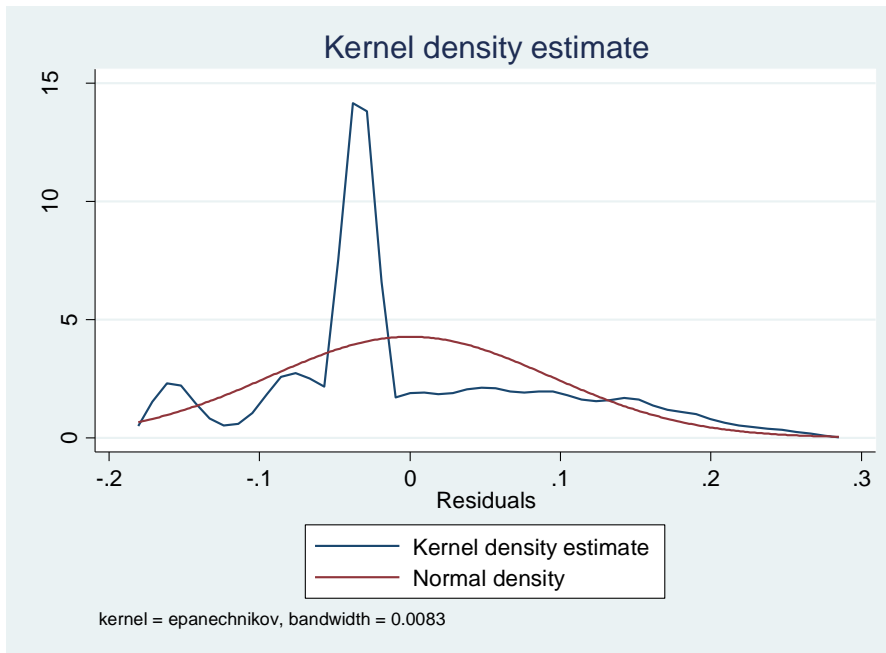
Figuur 20. Q-Q plot van residuals globaal scenario voor afstand DAR-voertuigen



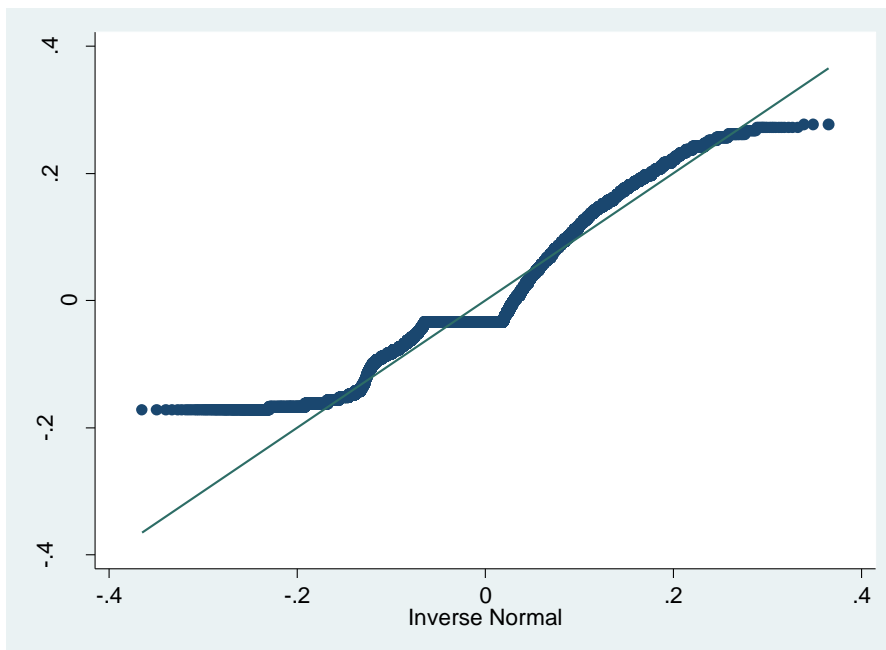
Figuur 21. Kernel density plot van *residuals* globaal scenario voor gemiddelde reistijd



Figuur 22. Q-Q plot van *residuals* globaal scenario voor gemiddelde reistijd

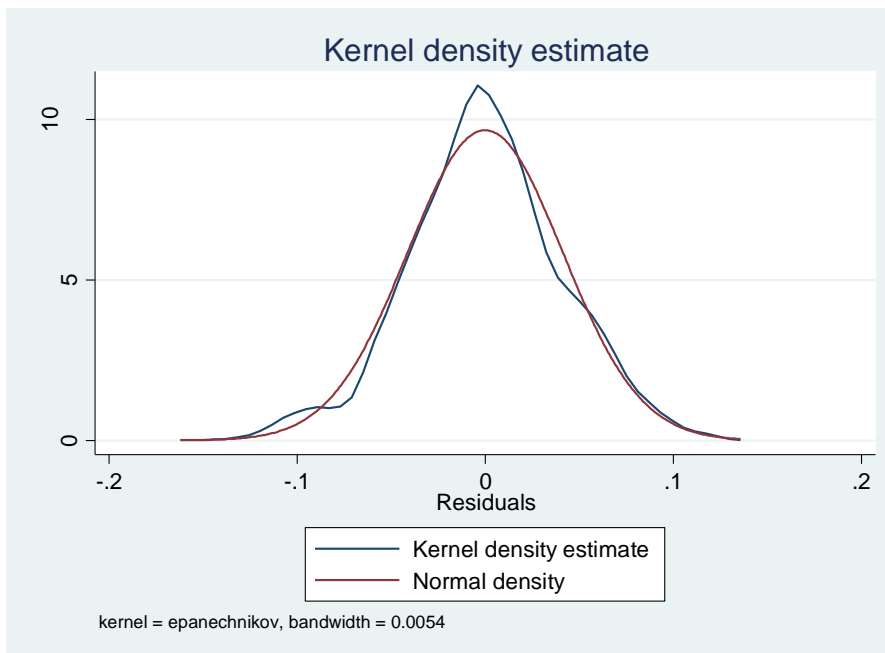


Figuur 23. Kernel density plot van residuals globaal scenario voor percentage openbaar vervoer

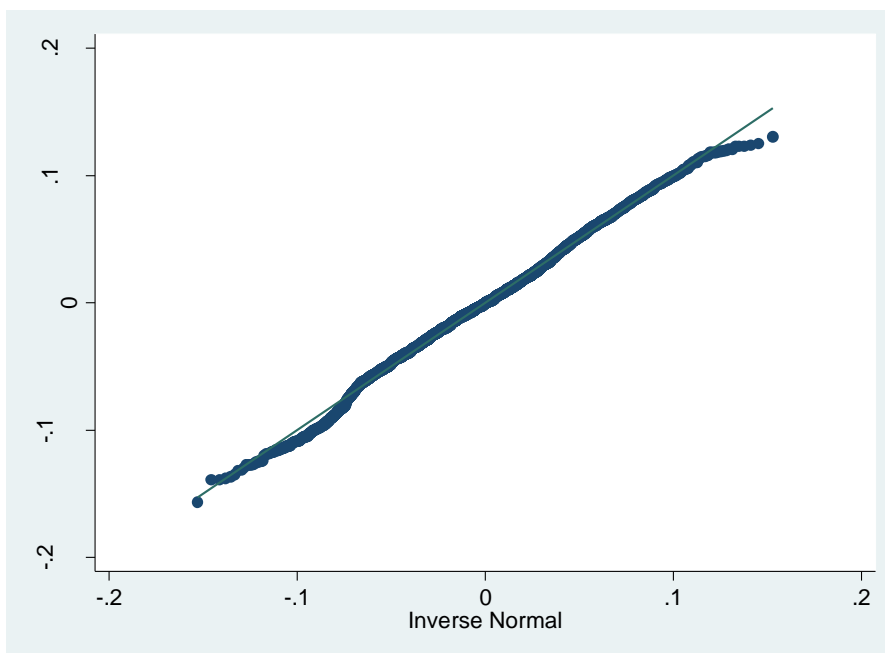


Figuur 24. Q-Q plot van residuals globaal scenario voor percentage openbaar vervoer

Bijlage 3. Kernel density plot en Q-Q plot voor residuals percentage openbaar vervoer



Figuur 25. Kernel density plot van *residuals* percentage openbaar vervoer



Figuur 26. Q-Q plot van *residuals* percentage openbaar vervoer