

2012•2013
FACULTEIT BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN
*master in de toegepaste economische wetenschappen:
handelsingenieur: operationeel management en logistiek*

Masterproef

Communicatietechnologie voor een gedistribueerde aanpak van rittenplanning
in logistieke netwerken

Promotor :
Prof. dr. Gerrit JANSSENS

Wouter Creemers

*Masterproef voorgedragen tot het bekomen van de graad van master in de toegepaste
economische wetenschappen: handelsingenieur, afstudeerrichting operationeel management
en logistiek*

2012•2013

FACULTEIT BEDRIJFSECONOMISCHE
WETENSCHAPPEN

*master in de toegepaste economische wetenschappen:
handelsingenieur: operationeel management en logistiek*

Masterproef

Communicatietechnologie voor een gedistribueerde aanpak
van rittenplanning in logistieke netwerken

Promotor :
Prof. dr. Gerrit JANSSENS

Wouter Creemers

*Masterproef voorgedragen tot het bekomen van de graad van master in de toegepaste
economische wetenschappen: handelsingenieur, afstudeerrichting operationeel management
en logistiek*

Woord vooraf

Deze masterproef vormt het sluitstuk van mijn opleiding tot master in de toegepaste economische wetenschappen handelsingenieur met als afstudeerrichting operationeel management en logistiek en optie marketing, aan de Universiteit Hasselt. Graag zou ik mijn oprechte dank betuigen aan enkele personen die mij geholpen en/of gesteund hebben bij de verwezenlijking van deze masterproef.

Mijn dank gaat eerst en vooral uit naar mijn promotor Prof. dr. Gerrit Janssens, voor zijn ideeën, raadgeving en begeleiding. Eveneens bedank ik graag mijn vrienden voor de steun en aanmoedigingen tijdens het schrijven van deze masterproef. Ook wil ik graag mijn vriendin bedanken die me op moeilijke momenten steeds de moed gaf om aan deze masterproef te werken.

Daarnaast wil ik nog een speciaal dankwoord richten aan mijn ouders. Zij hebben mij de kans geboden om mijn studies tot handelsingenieur succesvol af te leggen. Hun steun, vertrouwen en geloof in mijn kunnen waren onmisbaar tijdens het doorlopen van mijn studieloopbaan.

Samenvatting

Het beheer van goederentransport is tegenwoordig een zeer belangrijk aspect binnen ondernemingen. Doch, dankzij de stijgende complexiteit en de steeds veranderende beïnvloedingsfactoren is het creëren van een efficiënte en kostenbesparende ritten- en ladingplanning geen eenvoudige taak. Het beheer van goederentransport is immers vaak een geld- en tijdrovende activiteit (Fleischmann, Sandvoß, & Gnutzmann, 2004). De huidige technologische evolutie betreffende communicatiemiddelen kan hiervoor een oplossing bieden, door een platform of systeem te bieden waarmee ondernemingen hun rittenplanning en ladingkeuze op een gedistribueerde wijze kunnen aanpakken.

Een gedistribueerde aanpak houdt in dat beslissingen betreffende de lading en af te leggen route niet door een centrale entiteit genomen worden, maar dat de voertuigen of bestuurders zelf beslissingen maken aangaande hun route en lading. De voertuigen en/of bestuurders dienen hierbij enige vorm van autonomie te bezitten. Hiervoor dient het voertuig of de bestuurder te beschikken over actuele, dynamische gegevens. Echter vormt het verzamelen en verspreiden van dynamische gegevens vaak een probleem, maar dankzij de huidige vernieuwende communicatietechnologieën kunnen dynamische gegevens eenvoudiger verzameld worden en kunnen voertuigen met elkaar communiceren en dynamische gegevens uitwisselen.

Het laatste decennium zijn vele technologieën en methodes bedacht en ontwikkeld met het oog op het verzamelen, versturen en ontvangen van dynamische gegevens. Deze technologieën en methodes kunnen ingedeeld worden in twee groepen: infrastructuurgebaseerde methodes en infrastructuurvrije methodes (Ding, Wang, Meng, & Wu, 2010). De eerstgenoemde groep werkt volgens het *vehicle-to-infrastructure* (V2I) principe, waarbij alle voertuigen communiceren met communicatie-eenheden langs de weg. Deze immobiele communicatie-eenheden vormen een vaste infrastructuur. De tweede groep werkt volgens het *vehicle-to-vehicle* (V2V) principe. Hierbij communiceren de voertuigen met elkaar via een adhoc-netwerk, zonder gebruik te maken van communicatie-eenheden langs het wegennetwerk. Bij deze methode is geen vaste infrastructuur aanwezig.

Vele onderzoeken naar infrastructuurvrije V2V methoden werken met draadloze *multi-hop* verbindingen tussen voertuigen (Briesemeister, Schäfers en Hommel, 2000; Shibata et al., 2006;

Sago, Shinohara, Hara en Nishio, 2007). Hierbij fungeren alle voertuigen op het wegennetwerk als router. Deze voertuigen zenden informatiepakketten, die ze zelf verzameld hebben of van andere voertuigen ontvangen hebben, door naar alle andere voertuigen in de nabije omgeving. Op deze manier ontstaat een informatienetwerk waarin elk voertuig met elk ander voertuig in contact staat, hetzij via een directe of indirecte, *multi-hop* verbinding. Echter vormt de netwerkbelasting van infrastructuurvrije communicatiemethoden een nadeel doordat voertuigen voortdurend grote hoeveelheden dynamische gegevens delen met elkaar. Om deze reden dient de data steeds gecomprimeerd te worden of de verspreiding van de data gelimiteerd te worden. Doch blijkt overbelasting vaak nog steeds een probleem.

De infrastructuurvrije methoden kennen veelal dezelfde werking of werken volgens dezelfde principes. De vele infrastructuurgebaseerde methoden daarentegen zijn zeer uiteenlopend aangaande de werking of de gebruikte principes. Zo is het mogelijk om gebruik te maken van bijvoorbeeld *Radio Frequency Identification*, *Global Positioning Systems* of mobiele telefonie.

Radio Frequency Identification maakt het mogelijk om van op afstand labels te lezen en te overschrijven (Roberts, 2006; Weinstein, 2005). Op deze wijze ontstaat een tweezijdige communicatie, wat een gedistribueerde aanpak van rittenplanning mogelijk maakt. Het verzamelen van dynamische gegevens kan gebeuren door middel van *Global Positioning Systems* (Covaciu, Florea, Preda, & Timar, 2008; Tong, Merry, & Coifman, 2006). Hierbij verzamelen navigatietoestellen in de voertuigen dynamische gegevens die worden opgeslagen op harde schijven. Deze harde schijven kunnen nadien uitgelezen worden door computersystemen. Indien de navigatietoestellen uitgerust worden met een draadloze communicatie-eenheid, kunnen de dynamische gegevens ook onmiddellijk verspreid worden. Het analyseren van de signalen afkomstig van mobiele telefoons kan eveneens dynamische gegevens opleveren (Rose, 2006; Hsiao & Chang, 2005). Mobiele telefoons zenden immers voortdurend signalen uit die worden opgevangen door vaste zendmasten. Door middel van *Triangulatie of Timing Advance* kan een computersysteem de exacte positie van een voertuig op het wegennetwerk berekenen, gebruik makend van de signalen van mobiele telefoons. Een groot nadeel van alle infrastructuurgebaseerde methoden zijn de kosten die verbonden zijn aan het opzetten en opbouwen van de infrastructuur. Hierdoor is een louter infrastructuurgebaseerde netwerk economisch onhaalbaar.

Een combinatie van infrastructuurvrije en infrastructuurgebaseerde methoden vormt daarom een oplossing. Hierbij verloopt de communicatie over korte afstand via het *vehicle-to-vehicle* principe en verloopt de communicatie over lange afstand via zendmasten, die een groter bereik en snellere

communicatiesnelheid hebben dan zenders in de voertuigen zelf (Anda, Lebrun, Ghosal, Chuah en Zhang, 2005). De combinatie van infrastructuurvrije en infrastructuurgebaseerde communicatie biedt niet enkel een oplossing voor de overbelasting of snelheid van een V2V-netwerk en de hoge kosten van een V2I-netwerk, het biedt namelijk ook de gelegenheid om laad- en losplaatsen of andere gebouwen van de logistieke keten te integreren in het communicatienetwerk.

Hoewel de nood aan dynamische gegevens hoog is en de vraag naar infrastructuurvrije technologieën voor de verspreiding van dynamische gegevens groot is (Fleischmann, Sandvoß, & Gnutzmann, 2004), zijn zulke technologieën nog niet op de markt aanwezig. Infrastructuurgebaseerde technologieën zijn echter wel al aanwezig op de markt. Ondernemingen zoals Cellint, Airsage, INRIX en SIRIT bieden reeds dynamische verkeersinformatie aan hun gebruikers aan. Deze dynamische verkeersinformatie wordt vaak door middel van infrastructuurgebaseerde methoden verzameld, waarbij vooral gebruik gemaakt wordt van de signalen van mobiele telefoons. De meest gevorderde gecommmercialiseerde technologie is echter *HD Traffic* van TomTom. Deze technologie verzamelt verkeersinformatie gebruik makend van mobiele telefoons en GPS-toestellen. TomTom beschikt over één van de grootste netwerken om dynamische gegevens te verzamelen. Bovendien beweert TomTom dat hun navigatietoestellen in de toekomst in staat zullen zijn om met elkaar te communiceren. Dit zou een grote stap voorwaarts zijn in het bereiken van een volledig *vehicle-to-vehicle* communicatienetwerk. (TomTom, z.d.)

Talrijke proefprojecten zijn reeds gevoerd om de werking en mogelijkheden van zowel infrastructuurvrije als infrastructuurgebaseerde methoden verder te onderzoeken. COOPERS en CVIS zijn hier voorbeelden van. Veelal komen onderzoekers tot de conclusie dat de gebruikte methoden voor een verbetering van de verkeersstromen zorgen maar dat verder onderzoek noodzakelijk is om een optimale werking te bekomen. Hoewel de theoretische kaders rond infrastructuurgebaseerde en infrastructuurvrije communicatienetwerken zeer talrijk en reeds ver gevorderd zijn, zal verder onderzoek nodig zijn om deze technologieën te optimaliseren praktisch haalbaar te maken.

Hoewel enkele ondernemingen reeds methoden aanbieden om dynamische gegevens te verzamelen en te verspreiden en testprojecten uitwijzen dat de theoretische kaders rond V2V en V2I technologieën het mogelijk maken om dynamische gegevens te verzamelen en te verspreiden, zal verder onderzoek nodig zijn om deze communicatietechnologieën te gebruiken voor het hanteren van een gedistribueerde aanpak van rittenplanning en ladingkeuze in logistieke netwerken. Besloten wordt dat het gebruik van hedendaagse communicatietechnologie voor een gedistribueerde aanpak van rittenplanning en ladingkeuze in logistieke netwerken nog niet voor vandaag is.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	3
Samenvatting	5
Lijst der gebruikte afkortingen	11
Lijst der gebruikte figuren	13
Inleiding	15
Hoofdstuk 1. Dynamische gegevens voor rittenplanning en ladingkeuze van vrachtwagens	17
1.1 Bronnen van dynamische gegevens	20
1.2 Nood aan verzameling en verspreiding van dynamische gegevens	21
Hoofdstuk 2. Verzamelen, versturen en ontvangen van dynamische gegevens	23
2.1 Boordcomputers	26
2.2 Infrastructuurvrije methoden	28
2.3 Infrastructuurgebaseerde methoden	39
2.3.1 Conventionele Methoden	39
2.3.2 Radio Frequency Identification	41
2.3.3 Global Positioning System	43
2.3.4 Mobiele Telefonie	45
2.3.5 Andere methoden	50
2.4 Combinatie van infrastructuurvrije en infrastructuurgebaseerde methoden	53
Hoofdstuk 3. Theoretische raamwerken	57
3.1 Vehicle Ad Hoc netwerken	57
3.1.1 Vehicle-to-Vehicle Real-time Routing	57
3.1.2 Self-Organizing Traffic Information System	60
3.1.3 TrafficView	61
3.2 Radio Frequency Identification	62
Hoofdstuk 4. Toegepaste technologieën	65
4.1 Commerciële toepassingen.....	65
4.1.1 Cellint	65
4.1.2 Airsage.....	66
4.1.3 Intelligent Mechatronic Systems	67
4.1.4 INRIX	68
4.1.5 Mediamobile.....	68
4.1.6 Sirit Inc.	68
4.1.7 TomTom	69
4.1.8 Conclusie	70

4.2	Proefprojecten	71
4.2.1	Co-operative System for Intelligent Road Safety (COOPERS).....	71
4.2.2	Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems (CVIS).....	74
4.2.3	European Field Operational Test on Safe, Intelligent and Sustainable Road Operation (FOTsis).....	76
4.2.4	Conclusie	77
Algemene conclusie		79
Lijst der geraadpleegde werken.....		81

Lijst der gebruikte afkortingen

C

CFPD: Cellular Floating Phone Data System	69
COOPERS: Co-operative System for Intelligent Road Safety	71
CSC: Coopers Service Center	72
CSMA: Carrier Sense Multiple Access	29
CVIS: Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems	74

D

DCU: Data Collection Unit	54
---------------------------	----

F

FOTsis: European Field Operational Test on Safe, Intelligent and Sustainable Road Operation	76
---	----

G

GPRS: General Packet Radio Service	63
GPS: Global Positioning System	26, 43

H

HMI: Human Machine Interface	72
------------------------------	----

I

I2I: Infrastructure-to-Infrastructure	74
---------------------------------------	----

M

MAC: Medium Access Control	29
MANET: Mobile Ad Hoc Network	28

R

RFID: Radio Frequency Identification	41
RSU: Road Side Units	72

S

SMS: Short Messaging Service	48
SOTIS: Self-Organizing Traffic Information System	60

T

TA: Timing Advance	47
TCC: Traffic Control Center	71

V

V2I: Vehicle-to-Infrastructure	24
V2V: Vehicle-to-Vehicle	24
V2VRR: Vehicle-to-Vehicle Real-time Routing	57
VANET: Vehicle Ad Hoc Network	29
VGRID: Vehicular-based Networking and Computing grid	53
VTL: Virtual Trip Line	49

W

WLAN: Wireless Local-Area Network	28
WMN: Wireless Mesh Network	54

Lijst der gebruikte figuren

Figuur 1: (a) Vehicle-to-vehicle communication; (b) Vehicle-to-infrastructure communication (Ding, Wang, Meng, & Wu, 2010)	25
Figuur 2: De componenten van een navigatiesysteem (Ding, Wang, Meng, & Wu, 2010).....	26
Figuur 3: (a) Directe verbinding; (b) indirecte, <i>multi-hop</i> verbinding	28
Figuur 4: De wegenkaart wordt opgedeeld in zones (Shibata, et al., 2006)	31
Figuur 5: De linken die een zonegrens overschrijden (Shibata, et al., 2006)	31
Figuur 6: De huidige en toekomstige zones en groepering van voertuigen (Sago, Shinohara, Hara, & Nishio, 2007)	35
Figuur 7: Weergave van een RFID-systeem (Roberts, 2006).....	41
Figuur 8: Basisstations en hun cellen (Rose, 2006)	45
Figuur 9: Trilateratie met signaalsterkte (Rose, 2006)	46
Figuur 10: Voertuig dat celgrenzen doorkruist (Rose, 2006)	47
Figuur 11: (a) <i>Timing Advance</i> met fixatie op een digitale kaart; (b) Na verloop van tijd kunnen ook de route en snelheid van het voertuig berekend worden.	48
Figuur 12: Een laser scanner in het verlengde van een rijstrook (Fürstenberg et al., 2000)	51
Figuur 13: Profielen van respectievelijk: vrachtwagenaanhangwagen, transporteur, kleine auto, sportauto en pick-up (Fürstenberg et al., 2000)	51
Figuur 14: Laser scanner bovenop een verkeerslicht (Fürstenberg et al., 2000).....	52
Figuur 15: De vier functionele elementen van VGRID (Anda, LeBrun, Ghosal, Chuah, & Zhang, 2005).....	54
Figuur 16: De communicatie tussen de voertuigen en de router (Zhang, et al., 2007)	55
Figuur 17: Celgebaseerde V2V techniek (Jerbi, Senouci, Rasheed, & Ghamri-Doudane, 2007)	59
Figuur 18: Raamwerk voor afvalophaling gebruik makend van RFID (Faccio, Persona, & Zanin, 2011).....	62
Figuur 19: Visuele weergave van de verkeersinformatie via <i>TrafficSense</i> (Cellint, 2012)	66
Figuur 20: Weergave van de verkeersstoestand via <i>Metro Traffic Engine</i> (Intelligent Mechatronic Systems, 2013)	67
Figuur 21: De testtrajecten van COOPERS (COOPERS, 2010).....	71
Figuur 22: De elementen van COOPERS (COOPERS, 2010)	73

Inleiding

Tegenwoordig is het beheer van goederentransport een zeer belangrijk aspect binnen ondernemingen. Doch dankzij de stijgende complexiteit en de steeds veranderende beïnvloedingsfactoren is het creëren van een efficiënte en kostenbesparende ritten- en ladingplanning geen eenvoudige taak. Het beheer van goederentransport is immers vaak een geld- en tijdrovende activiteit. (Fleischmann, Sandvoß, & Gnutzmann, 2004). De huidige technologische evolutie betreffende communicatiemiddelen kan hiervoor een oplossing bieden, door een platform te bieden waarmee ondernemingen hun rittenplanning en ladingkeuze op een gedistribueerde wijze kunnen aanpakken.

Een gedistribueerde aanpak houdt in dat beslissingen betreffende de lading en af te leggen route niet door een centrale entiteit genomen worden, maar dat de voertuigen of bestuurders zelf beslissingen kunnen maken aangaande hun route en lading. De voertuigen en/of bestuurders dienen hierbij enige vorm van autonomie te bezitten. Maar puur vanuit statische, vooropgesteld gegevens kan er geen autonomie zijn, vermits geen beslissingen onderweg gemaakt dienen te worden. Pas als dynamische gegevens in rekening genomen worden, kunnen de voertuigen enige vorm van autonomie vertonen door deze dynamische gegevens zelf in rekening te nemen om optimale beslissingen te nemen aangaande de eigen route en lading. Werken met dynamische gegevens heeft echter wel als noodzaak dat de voertuigen en/of bestuurders beschikken over deze nodige dynamische gegevens waarop ze hun beslissingen kunnen baseren en bovendien dienen deze gegevens zo actueel mogelijk gehouden te worden. De huidige technologische evolutie betreffende communicatiemiddelen stelt ondernemingen, voertuigen en bestuurders in staat om dynamische gegevens te verzamelen, te versturen, te ontvangen en te gebruiken van dynamische gegevens.

Bovendien blijkt dat het toepassen van een communicatietechnologie dat elk voertuig en/of elke bestuurder autonoom zijn route en lading laat berekenen, rekening houdend met de steeds veranderende dynamische gegevens, ondernemingen veel tijd en geld kan besparen (Taniguchi & Shimamoto, 2004). Een efficiënte communicatietechnologie voor de rittenplanning en ladingkeuze in logistieke netwerken biedt veel mogelijkheden en voordelen voor ondernemingen.

Deze masterproef heeft tot doel te onderzoeken welke vernieuwende communicatietechnologieën ondernemingen in staat kunnen stellen om een gedistribueerde aanpak van rittenplanning en

ladingkeuze te voeren. Hierbij wordt niet onderzocht op welke algoritmen ondernemingen, voertuigen en bestuurders berekeningen met dynamische gegevens kunnen baseren, maar op welke wijze de dynamische gegevens verzameld, verstuurd en ontvangen kunnen worden. Ondanks de technologische evolutie blijkt het immers nog steeds geen eenvoudige taak om dynamische gegevens te verzamelen, te verspreiden en actueel te houden. De nadruk wordt gelegd op de vernieuwende communicatietechnologieën daar de conventionele communicatietechnologieën, hoewel ingeburgerd, tekort schieten voor gebruik in gedistribueerde netwerken. Bovendien zal de focus enkel liggen op het wegvervoer vermits deze methode van goederenvervoer de meest gebruikte is. In Europa en Vlaanderen wordt namelijk jaarlijks respectievelijk 76,4%¹ en 78,2%², van de getransporteerde goederen vervoerd over de weg (eurostat, 2012; Secretariaat van de Mobiliteitsraad van Vlaanderen, 2009). Enkel het theoretische aspect van de vernieuwende communicatietechnologieën zal aan bod komen. Hierbij wordt niet uitgeweken naar het praktische of technische aspect van deze technologieën.

Deze masterproef handelt vooreerst over dynamische gegevens. De bronnen van dynamische gegevens worden uiteengezet en de nood aan dynamische gegevens wordt onderzocht. In een volgend hoofdstuk worden enkele technologieën behandeld die het verzamelen, versturen en ontvangen van dynamische gegevens ondersteunen, hierbij wordt een indeling gemaakt tussen technologieën met een vaste infrastructuur en zonder een vaste infrastructuur. Nadien worden enkele raamwerken behandeld die het gebruik van de vernieuwende communicatietechnologieën voor het berekenen van rittenplanning en ladingkeuze mogelijk maken. Hierop volgend wordt nagegaan welke vernieuwende technologieën tegenwoordig reeds toegepast worden, zowel in testprojecten als commerciële projecten. Tot slot volgt een algemene conclusie.

¹ Volgens statistieken van september 2012

² Volgens statistieken van 2006

Hoofdstuk 1. Dynamische gegevens voor rittenplanning en ladingkeuze van vrachtwagens

Deze masterproef handelt over het verzamelen en verspreiden van dynamische gegevens die van toepassing zijn op de ladingkeuze en rittenplanning van vrachtwagens. Vooraleer verder te gaan dient de term 'dynamische gegevens', zoals in dit werk gebruikt, verder uitgelegd. Gezien doorheen de tijd kan gesproken worden van drie soorten data. Er zijn historische data, actuele data en voorspelde data (Taniguchi & Shimamoto, 2004). Historische data betreffen alle gegevens en informatie die in het verleden verzameld zijn. De gegevens die op het eigenste moment verzameld worden, noemen actuele data. Voorspelde data zijn de gegevens en informatie die een voorspelling geven voor de toekomst.

Onder historische data worden in dit werk alle gegevens gezien die op voorhand gekend zijn, statische gegevens. Deze data worden gezien als een gegeven bij het opstellen van een eerste rittenplanning. Van historische, statische data worden eveneens verwacht dat deze doorheen de tijd niet meer wijzigen. Voorspelde data betreffen gegevens die de toekomst beschrijven, gebaseerd op de historische gegevens. Voorspelde data vormen namelijk een schatting van de toekomst door middel van het zoeken naar patronen in historische data. Indien de gemiddelde snelheid op een autosnelweg gedurende de voorbije 100 dagen ongeveer 80 kilometer per uur bedroeg, kan voorspeld worden dat die gemiddelde snelheid de komende dagen eveneens 80 kilometer per uur zal bedragen. Voorspelde data kan eveneens gecategoriseerd worden als statische data, daar voorspelde data al op voorhand gekend zijn door patronen in de historische data. (Taniguchi & Shimamoto, 2004)

De actuele data betreffen de dynamische gegevens waarover dit werk zal handelen. Onder actueel wordt in dit werk gezien de huidige tijd plus en minus enkele uren. Daar de gegevens binnen dit tijdsbestek de reële tijd beschrijven en hierdoor relatief nieuw zijn, bestaat enige onzekerheid over deze gegevens. Binnen het tijdsbestek van de huidige tijd plus enkele uren kunnen zich immers onvoorziene omstandigheden voordoen, zoals een verkeerscongestie, een lekke band of nieuwe bestellingen. De actuele data betreffen data die steeds wijzigen en elk moment opnieuw kunnen wijzigen, dynamische data genoemd. Voor dynamische gegevens wordt een tijdsbestek van de huidige tijd plus en minus enkele uren genomen. De huidige tijd minus enkele uren, omdat actuele gegevens uiteraard geanalyseerd en verspreid moeten worden, dit kan een bepaalde tijd duren.

Bovendien zijn plotse gebeurtenissen die een aantal uren geleden gebeurd zijn, toch nog steeds nieuw, daar deze niet op voorhand gekend waren. De huidige tijd plus enkele uren, omdat op basis van de actuele gegevens dynamische voorspellingen gemaakt kunnen worden voor de zeer nabije toekomst. Dit zijn meestal voorspellingen voor de toekomst die door onverwachte gebeurtenissen tijdelijk afwijken van de voorspellingen gebaseerd op historische data.

Van de vele studies betreffende rittenplanning in logistieke netwerken werkt het grootste gedeelte met vooropgestelde, statische gegevens. Met name worden alle reeds gekende gebeurtenissen die zich in het verleden voorgedaan hebben in parameters beschreven om vervolgens te gebruikt te worden in een algoritme of heuristiek. Echter is de vraag naar dynamische algoritmen en dynamische gegevens tegenwoordig steeds groter, deze houden namelijk rekening met de veranderende omgevingsfactoren. (Fleischmann, Sandvoß, & Gnutzmann, 2004)

Het werken met dynamische gegevens en omgevingsfactoren vormt echter een probleem doordat de gegevens steeds wijzigen en vaak niet veralgemeenbaar zijn. Denk aan verkeersopstoppingen die op één welbepaalde plaats van het wegennetwerk zorgen voor vertraging en niet op het gehele wegennetwerk. De conventionele technologieën voor het verzamelen van deze dynamische gegevens schieten veelal tekort doordat ze een beperkte weergave geven van de dynamische omgevingsfactoren. Om deze reden is recent veel onderzoek gevoerd naar technologieën voor het verzamelen en verspreiden van dynamische gegevens (Ding, Wang, Meng, & Wu, 2010).

Het incorporeren van dynamische gegevens in de rittenplanning zorgt echter eveneens voor complexe problemen voor de optimalisatie, doordat routes en ladingen vele malen herberekend dienen te worden en dit voor vaak zeer grote voertuigparken. Hierdoor is een overgang van de huidige gecentraliseerde aanpak (Toth & Vigo, 2002; Taniguchi & Shimamoto, 2004) naar een gedecentraliseerde aanpak nodig. (Wenning, Pesch, & Timm-Giel, 2006)

Bij een gecentraliseerde aanpak worden alle gegevens verzameld op een centraal punt, waarna op basis van deze gegevens een optimale rittenplanning berekend wordt voor het gehele voertuigenpark. De voertuigen bezitten geen enkele vorm van intelligentie en ontvangen hun voorgeprogrammeerde rittenplanning via draadloze communicatie. Een voorbeeld hiervan is gecentraliseerde verkeersinformatie. Deze verkeersinformatie wordt verzameld door middel van sensoren ingebouwd in het wegdek of de berm. Deze informatie wordt doorgezonden naar een centraal verkeersinformatiecentrum, dat de gegevens analyseert en een actueel beeld probeert te vormen van de huidige verkeerssituatie. De uitkomst van de analyse wordt daarna terug

doorgegeven aan de bestuurders of navigatietoestellen via draadloze communicatie. Een eerste nadeel van een gecentraliseerde aanpak betreft de vertraging die zulke aanpak kent. Het duurt immers een bepaalde tijd vooraleer actuele informatie geanalyseerd wordt door het verkeersinformatiecentrum en doorgestuurd wordt naar de voertuigen en bestuurders. Een ander nadeel betreft dat het centrale punt dat de berekeningen en analyses maakt een zeer groot zendbereik moet hebben en vaak beschikt over een kleine bandbreedte. Hierdoor kan het centraal punt enkel algemene informatie doorgeven en dit slechts periodiek. (Wischhof, Ebner, Rohling, Lott, & Halfmann, 2003; Jerbi, Senouci, Rasheed, & Ghamri-Doudane, 2007)

De gedecentraliseerde aanpak werkt niet vanuit een centraal punt, maar vanuit elk voertuig afzonderlijk. Elk voertuig verzamelt en ontvangt afzonderlijk de nodige gegevens om een eigen optimale route en lading te berekenen, rekening houdend met de routes en ladingen van alle andere voertuigen in het voertuigenpark. De voertuigen, eventueel zelfs de ladingen, worden zo intelligente schakels binnen de waardeketen die zelf beslissingen kunnen nemen. (Wenning, Pesch, & Timm-Giel, 2006)

1.1 Bronnen van dynamische gegevens

Daar deze masterproef zich toespitst op het gebruik van dynamische gegevens, dient eerst duidelijk gemaakt welke dynamische omgevingsfactoren invloed hebben op rittenplanning en ladingkeuze voor vrachtwagens binnen logistieke netwerken.

De bronnen van dynamische gegevens worden in dit werk in drie subdomeinen opgedeeld. Vooreerst zijn er de dynamische omgevingsfactoren die zich voordoen op het af te leggen traject. Een tweede subdomein wordt gevormd door de dynamische omgevingsfactoren die zich voordoen bij de laad- en losplaatsen. Het derde subdomein bestaat uit de dynamische omgevingsfactoren die het voertuig zelf beïnvloeden. Deze indeling volgt het veelgebruikte boog en knooppunten denkkader. Hierbij wordt het te volgen traject door bogen voorgesteld en de laad- en losplaatsen door knooppunten. De voertuigen stellen de bewegingen over de bogen van knooppunt naar knooppunt voor.

De dynamische omgevingsfactoren die invloed hebben op het af te leggen traject, het eerste subdomein volgens dit werk, zijn zeer talrijk. Zo vormen de variabele reistijden ten gevolge van de wijzigende verkeersstromen een belangrijke factor (Fleischmann, Sandvoß, & Gnutzmann, 2004). Voorbeelden hiervan zijn filevorming en tragere gemiddelde snelheden dan de maximum toegelaten snelheid. Een andere dynamische omgevingsfactor binnen dit subdomein zijn de weercondities. Bij hevige sneeuwval bijvoorbeeld kunnen bepaalde wegen ontoegankelijk worden of wordt het onmogelijk om bepaalde delen van het traject af te leggen.

Dynamische omgevingsfactoren binnen het tweede subdomein, de laad- en losplaatsen, zijn minder talrijk. Dit subdomein wordt voornamelijk gekenmerkt door wijzigende orders. Nieuwe pakketten kunnen aankomen in laad- en losplaatsen, zendingen kunnen geannuleerd worden, spoedzendingen kunnen aankomen of een onvoorziene vraag naar *reverse logistics* ontstaat (Ghiani, Guerriero, Laporte, & Musmanno, 2003). Goederen die wijzigen of verloren gaan gedurende hun verblijf binnen de laad- en losplaatsen behoren eveneens tot deze categorie.

Het derde subdomein dat dit werk onderscheidt, het voertuig zelf, wordt gekenmerkt door de conditie van het voertuig. Zo kan een lekke band de planning in de war sturen of kan de maximumsnelheid van het voertuig dalen vanwege technische problemen. Hier moet echter duidelijk onderscheid gemaakt worden tussen dynamische en statische gegevens of gebeurtenissen. Het brandstofverbruik, hoewel lijkend op een dynamische factor, betreft een statische factor vanwege de redelijk nauwkeurige voorspelbaarheid van het verbruik.

1.2 Nood aan verzameling en verspreiding van dynamische gegevens

De vraag naar dynamische gegevens en algoritmen heeft een sterke stijging gekend. De voornaamste reden voor deze groeiende vraag naar dynamische gegevens valt toe te schrijven aan de vooruitgang in informatie- en communicatietechnologieën en het steeds groeiende aantal veeleisende klanten van de logistieke sector (Fleischmann, Sandvoß, & Gnutzmann, 2004).

De vooruitgang in informatie- en communicatietechnologieën zorgen immers dat het verzamelen, analyseren en gebruiken van dynamische gegevens vlotter en gemakkelijker kan gebeuren. Zo wordt het uiteindelijk mogelijk om met actuele gegevens te werken en zo in real-time te reageren op dynamische omgevingsfactoren. De vooruitgang op technologisch vlak stelt bovendien de klanten van de logistieke sector in staat om zelf zeer actueel tewerk te gaan met betrekking tot hun bedrijfsvoering. De online markten zijn hier een voorbeeld van. Echter zorgt de hevige concurrentie ervoor dat ondernemingen zich willen onderscheiden door hun klanten een snelle service te bieden. Dit heeft als resultaat dat de klanten van de logistieke sector veeleisender worden met betrekking tot de snelheid en stiptheid van leveringen. (Fleischmann, Sandvoß, & Gnutzmann, 2004)

Bovendien maakt het gebruik van dynamische gegevens een veel realistischere benadering mogelijk dan enkel het gebruik van statische gegevens. Het gebruik van dynamische verkeersinformatie zou eveneens de totale reistijd doen afnemen (Fleischmann, Gietz, & Gnutzmann, 2004). Een studie van Schrank en Lomax (2007) toont tevens aan dat verkeersopstoppingen in 75 stedelijke gebieden in de Verenigde Staten van Amerika zorgden voor grote vertragingen en grote hoeveelheden verloren brandstof, ten gevolge een economisch verlies van samen 56 miljard euro per jaar. Op het drukke wegennet van België liep dit economische verlies door congestie in 2007 zelfs op tot 437,5 miljoen euro per dag oftewel een kleine 160 miljard euro op jaarbasis. Het economisch verlies van een personenwagen in de file bedraagt 8,25 euro per uur, die van een zakenman 22 euro per uur en die van een vrachtwagen maar liefst 45,95 euro per uur. (VOKA & BECI, 2010) Dit terwijl meerendeel van dit economisch verlies bespaard kon worden indien de bestuurders of de voertuigen actuelere en real-time, dynamische, informatie voorzien konden worden. (Jerbi, Senouci, Rasheed, & Ghamri-Doudane, 2007).

De evolutie in de waardeketens voedt eveneens de nood aan dynamische gegevens. Nieuwe werkwijzen als *reverse logistics* en *supply chain collaboration* vragen immers een grote en goed georganiseerde hoeveelheid dynamische gegevens. Voor *reverse logistics* is het nodig dat een

vrachtwagen die een bepaalde hoeveelheid levert aan een bepaalde klant eveneens weet hoe groot de lading is die hij bij diezelfde klant moet opladen. Echter wijzigen deze gegevens vaak en dienen deze gegevens actueel gehouden te worden zodat op elk moment geweten is wat de inhoud van de terugzending is en waar deze terugzending naartoe moet. Al deze dynamische gegevens moeten ingewerkt worden in de rittenplanning. (Global Commerce Initiative & Capgemini, 2008)

Supply chain collaboration betreft onder andere een samenwerking tussen verschillende ondernemingen om de capaciteit van vrachtwagens zo goed mogelijk te benutten. Dit kan gaan van ondernemingen die samenwerken om één vrachtwagen maximaal te beladen in de heenrit, tot ondernemingen die samenwerken om een vrachtwagen zowel in de heenrit als de terugrit te benutten. Dit wordt vooral gedaan om de hoge kosten van halfvolle en lege vrachtwagens te minimaliseren en de kosten te verdelen over een maximale lading. Bovendien zorgt deze werkwijze ervoor dat de ecologische voetafdruk beperkt wordt. Tegenwoordig rijden immers één op vier vrachtwagens zonder lading³, wat de economische kost en ecologische voetafdruk doet stijgen. *Reverse logistics* en *Supply chain collaboration* zorgen echter voor een grote hoeveelheid aan dynamische gegevens terwijl beide een zeer goede integratie vragen van deze dynamische gegevens om een optimale werking te verzekeren. Het is hierbij van uiterst belang dat vrachtwagens en ondernemingen op elk moment beschikken over de dynamische gegevens van elkaar. (Global Commerce Initiative & Capgemini, 2008)

³ Volgens de National Private Truck Council, Arizona

Hoofdstuk 2. Verzamelen, versturen en ontvangen van dynamische gegevens

Alvorens gebruik gemaakt kan worden van dynamische gegevens, dienen deze uiteraard eerst verzameld te worden. Vele conventionele technologieën en methodes om dynamische gegevens te verzamelen, zoals koperlussen in het wegdek en camera's, kennen reeds diverse toepassingen. Echter zijn deze technologieën en methodes vaak omslachtig, langzaam en niet efficiënt om op grote schaal toegepast te worden. Om deze redenen zijn vele onderzoeken gevoerd om het verzamelen, versturen en ontvangen van dynamische gegevens te verbeteren, gebruik makend van de huidige technologische ontwikkelingen betreffende communicatiemiddelen (Ding, Wang, Meng, & Wu, 2010). Het laatste decenium zijn dan ook vele technologieën en methodes bedacht en ontwikkeld met het oog op het verzamelen, versturen en ontvangen van dynamische gegevens. Terwijl sommige van deze vernieuwende technologieën al gebruikt worden, zijn andere nog slechts in de concept- of proeffase.

Het voornaamste doel van vele onderzoekers (o.a. Wischhof, Ebner, Rohling, Lott, & Halfmann, 2003; Nadeem, Dashtinezhad, Liao, & Iftode, 2004; Chen & Cai, 2005; Sago, Shinohara, Hara, & Nishio, 2007; Kitani, et al., 2008; Leduc, 2008) betreft het verhelpen van verkeerscongestie en het verbeteren van de veiligheid op het wegennetwerk door middel van het verzamelen en verspreiden van dynamische gegevens omtrent de verkeerssituaties (Ding, Wang, Meng, & Wu, 2010). Hoewel deze onderzoeken niet focussen op gedistribueerde rittenplanning in logistieke netwerken, blijken vele van deze onderzoeken toch nuttig. De onderzoeken focussen immers op een veelvoorkomende bron van dynamische gegevens, namelijk de verkeerssituatie op de af te leggen route. Daar deze dynamische gegevens eveneens nodig zijn voor het voeren van een gedistribueerde rittenplanning, zijn de onderzoeken die hieromtrent gevoerd worden toch nuttig. Vermits de dynamische gegevens omtrent de verkeerssituatie zeer belangrijk zijn voor de optimalisatie van rittenplanning en naar deze dynamische gegevens eveneens het meeste onderzoek gevoerd is, zal dit werk grotendeels bestaan uit de bespreking van technologieën die deze dynamische gegevens aanpakken. Toch dient ook opgemerkt te worden dat de technologieën voor het verzamelen van dynamische verkeersinformatie mits kleine aanpassingen eveneens gebruikt kunnen worden om een gedistribueerde aanpak van rittenplanning in logistieke netwerken te voeren. Vooral om deze laatste reden zijn deze onderzoeken zeer nuttig.

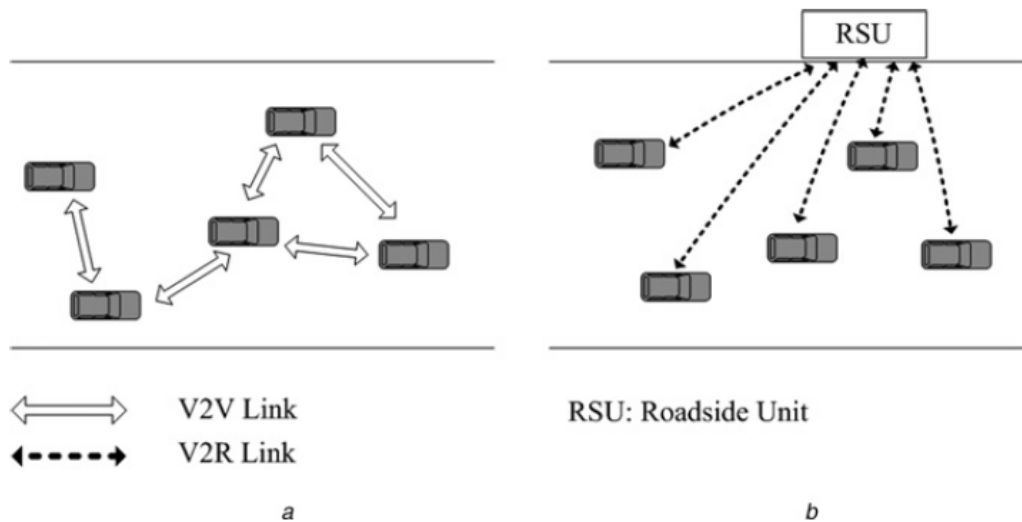
Eveneens zijn onderzoeken (o.a. Dikaiakos, Florides, Nadeem, & Iftode, 2007; Ustundag & Cevikcan, 2008; Wycisk, McKelvey, & Hülsmann, 2008; Wen, 2010) gevoerd naar technieken en technologieën

om het verzamelen en gebruiken van andere dynamische gegevens, afkomstig van de andere twee bronnen, het voertuig en de laad- en losplaatsen, te verbeteren. Hoewel de informatie omtrent deze technologieën relatief beperkt is, zullen enkele van deze technologieën toch uitgelicht worden.

De technologieën en methodes voor het verzamelen van dynamische verkeersinformatie kunnen op tal van manieren ingedeeld worden. Zo maken Hsiao en Chang (2005) een verschil tussen voertuigdetectoren en voertuigsondes om verkeersinformatie te verzamelen. In het geval van technologieën die gebruik maken van voertuigdetectoren verzamelen detectoren geïntegreerd langs de wegwijk de dynamische gegevens omtrent de verkeerstoestand. Deze detectoren tellen het aantal voertuigen of meten hun snelheid. Echter zijn deze detectoren vaak zeer kostelijk, wat een groot nadeel vormt. Bovendien kunnen de detectoren slechts op bepaalde locaties geïnstalleerd worden, wat een beperkte meting die niet het gehele wegennetwerk dekt, oplevert (Ding, Wang, Meng, & Wu, 2010). Bij technologieën die werken met voertuigen als sondes, zijn het de voertuigen zelf die dynamische gegevens verzamelen, gebruik makend van diverse draadloze communicatietechnologieën en een *Global Positioning System*. (Hsiao & Chang, 2005) Deze methode heeft als groot voordeel dat de voertuigen, die de dynamische gegevens verzamelen, zich voortbewegen over het wegennetwerk. Op deze manier kan informatie verzameld worden over het gehele wegennetwerk, in tegenstelling tot de detectoren die slechts een beperkte oppervlakte dekken.

Ding, Wang, Meng en Wu (2010) maken gebruik van een andere indeling. Zij stellen dat verkeersinformatie op twee methoden verzameld kan worden: een methode die gebruik maakt van speciale vaste infrastructuur en een methode die geen gebruik maakt van vaste infrastructuur. De eerstgenoemde methode werkt volgens het *vehicle-to-infrastructure* (V2I) principe, waarbij alle voertuigen communiceren met sensoren en communicatie-eenheden langs de wegwijk. Deze immobiele sensoren en communicatie-eenheden vormen een vaste infrastructuur. Deze methode wordt geïllustreerd in Figuur 1(b). De tweede methode werkt volgens het *vehicle-to-vehicle* (V2V) principe. Hierbij communiceren de voertuigen met elkaar, zonder gebruik te maken van sensoren of communicatie-eenheden naast het wegennetwerk. Bij deze methode is geen vaste infrastructuur aanwezig, zoals geïllustreerd in Figuur 1 (a).

Indien de indelingen volgens Hsiao en Chang (2005) en Ding et al. (2010) vergeleken worden, kan opgemerkt worden dat twee soorten sterk op elkaar lijken, namelijk de *vehicle detectors* volgens Hsiao en Chang (2005) en de infrastructuurgebaseerde methodes volgens Ding et al. (2010). Meerbepaald kan gesteld worden dat de *vehicle detectors* onderdeel uitmaken van de



Figuur 1: (a) Vehicle-to-vehicle communication; (b) Vehicle-to-infrastructure communication (Ding, Wang, Meng, & Wu, 2010)

infrastructuurgebaseerde methoden. Een detector maakt deel uit van de infrastructuur van de weg en zit meestal ingebed in de wegkant of het wegdek. Echter kan niet eenzelfde conclusie gemaakt worden voor *vehicle probes* en infrastructuurvrije methoden. Uit het verdere werk zal namelijk blijken dat technologieën die gebruik maken van *vehicle probes* niet altijd infrastructuurvrij zijn. Zo maakt bijvoorbeeld de GSM-technologie gebruik van zendmasten, wat de technologie niet zuiver infrastructuurvrij maakt. In dit verdere werk zal daarom de indeling van Ding et al. (2010) gevolgd worden.

Zoals reeds eerder aangehaald gebruikten Ding et al. (2010) deze infrastructuurvrije en infrastructuurgebaseerde indeling om methodes voor het verzamelen van verkeersinformatie in te delen. Echter zullen in dit werk niet enkel methodes voor het verzamelen van verkeersinformatie, maar ook methodes voor het verzamelen van andere dynamische gegevens ingedeeld worden volgens het principe van infrastructuurvrije en infrastructuurgebaseerde verzamelmethodes.

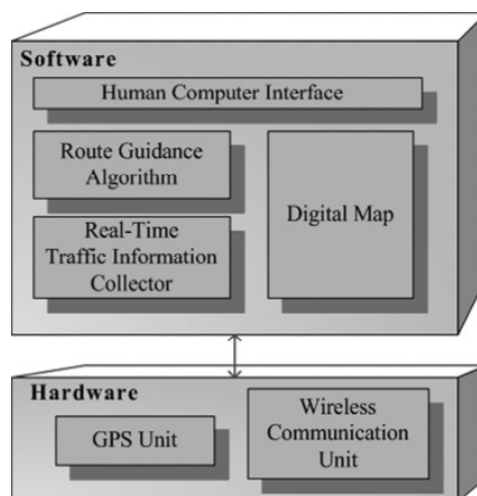
In dit verdere deel wordt vooreerst een algemeen beeld gegeven van een boordcomputer, nodig om het voertuig te integreren in de verschillende technologieën. Vervolgens worden de methodes voor het verzamelen van dynamische gegevens uitvoerig besproken, met inachtnaam van de opdeling in infrastructuurvrije en infrastructuurgebaseerde methodes.

2.1 Boordcomputers

Alvorens de infrastructuurvrije en infrastructuurgebaseerde technologieën te bespreken, dient aangehaald te worden dat beide technologieën een boordcomputer vereisen die in staat is om gegevens op te slaan, te versturen en te analyseren. Voorts is het eveneens noodzakelijk dat de boordcomputer uitgerust is met of gekoppeld is aan een *Global Positioning System* (GPS) en in staat is om digitale weergaven van de te volgen route te tonen. Bovendien moet de gebruiker in staat zijn om de boordcomputer te beheren en te besturen en in de mogelijkheid zijn tal van toepassingen te gebruiken.

Navigatiesystemen zijn tegenwoordig sterk ingeburgerd in de maatschappij. Onderzoek van Berg Inside AB (2010) toont dat in 2009 wereldwijd ongeveer 40 miljoen alleenstaande navigatietoestellen en ongeveer 150 miljoen mobiele telefoons met navigatiefunctieiteit verkocht werden. Berg Inside verwacht in 2014 zelfs een verkoop van wel 770 miljoen mobiele telefoons met navigatiefunctieiteit. Echter kunnen deze navigatietoestellen en mobiele telefoons de rol van boordcomputer, zoals nodig voor tal van technologieën, niet vervullen. De toestellen laten de gebruiker enkel toe om de kortste of de op maximum snelheid gebaseerde snelste route te berekenen.

Een navigatiesysteem kan volgens Ding, Wang, Meng en Wu (2010) opgedeeld worden in twee hoofdcomponenten, namelijk de softwarecomponent en de hardwarecomponent (Figuur 2). De softwarecomponent bestaat uit vier delen. Het navigatiealgoritme (*Route Guidance Algorithm*) is een algoritme dat aan de hand van de verkregen inputparameters de kortste of de op maximum snelheid



Figuur 2: De componenten van een navigatiesysteem (Ding, Wang, Meng, & Wu, 2010)

gebaseerde snelste route gaat berekenen. De *Real-Time Traffic Information Collector* verzamelt alle verkeersinformatie die van toepassing is op de te volgen route en geeft deze informatie door aan het navigatiealgoritme. Aan de hand van deze verkeersinformatie zal het navigatiealgoritme opnieuw de kortste of snelste route berekenen. De digitale kaart (*Digital Map*) van het navigatietoestel is een digitale weergave van het wegennetwerk. De *Human Computer Interface* stelt de gebruiker in staat om te werken met het navigatiesysteem en het navigatiesysteem te bedienen. Het voorziet een grafische weergave en tal van andere multimediagemogelijkheden die het de gebruiker gemakkelijk maakt om met het navigatiesysteem om te gaan.

De hardwarecomponent bestaat slechts uit twee delen. De *GPS Unit* localiseert de positie van het voertuig en plaatst deze op de digitale kaart. De draadloze communicatie-eenheid (*Wireless Communication Unit*) brengt controleberichten en databerichten over naar andere voertuigen of naar centrale informatiecentra. (Ding, Wang, Meng, & Wu, 2010)

De zes onderdelen samen stellen het navigatiesysteem in staat om de gebruiker de kortste of snelste route te berekenen en te volgen. Echter stellen Ding et al. (2010) dat de kortste of de op maximum snelheid berekende route niet altijd de snelste route is door de dynamische verkeerscondities. Deze dynamische verkeerscondities, zoals filevorming, verlagen namelijk de maximumsnelheid van een voertuig. Hier houden de meeste navigatiesystemen echter geen rekening mee.

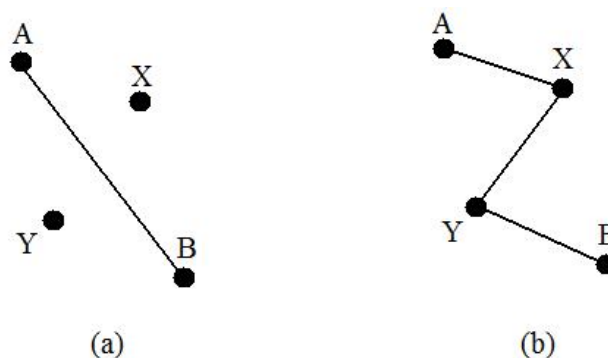
Dat het navigatiesysteem, zoals voorgesteld volgens Ding et al. (2010), de rol van boordcomputer niet helemaal kan vervullen, werd al aangehaald. Wel kan het navigatiesysteem als basis dienen om de boordcomputer op uit te bouwen. Het navigatiesysteem volgens Ding et al. (2010) beschikt namelijk al over enkele mogelijkheden vereist door vele technologieën, zoals een GPS, digitale kaart, *Human Computer Interface*, communicatie-eenheid, enzovoort. Echter worden door bepaalde technologieën die verder besproken worden specifieke eisen gesteld aan de boordcomputer. Het navigatiesysteem kan uitgebreid of omgebouwd worden zodat het voldoet aan de specificaties van de technologie. Om deze reden vormt het navigatiesysteem, zoals voorgesteld volgens Ding et al. (2010), een goede basis voor de meeste technologieën.

2.2 Infrastructuurvrije methoden

Een infrastructuurvrije methode om informatie te delen, adhoc-netwerk genaamd, maakt geen gebruik van vaste infrastructuur om informatie van zender naar ontvanger over te brengen. Waar bij infrastructuurgebaseerde methoden contact gemaakt wordt met een contactpunt om gegevens over te brengen van zender naar ontvanger, gebeurt deze overdracht bij infrastructuurvrije methodes rechtstreeks, zonder tussenkomst van een vast contactpunt.

De apparaten, zender en ontvanger, in een adhoc-netwerk zijn draadloos met elkaar verbonden. De verbinding kan een directe of een indirecte, *multi-hop* verbinding zijn (Sago, Shinohara, Hara, & Nishio, 2007). In Figuur 3 wordt het verschil tussen beide verbindingen visueel voorgesteld. Figuur 3(a) toont een directe verbinding tussen knooppunten A en B. Figuur 3(b) geeft een indirecte verbinding tussen knooppunten A en B weer, waar knooppunt A in verbinding staat met knooppunt B gebruik makend van tussenknooppunten X en Y. Een *multi-hop* verbinding kan bijvoorbeeld tot stand komen doordat de afstand tussen knooppunten A en B te groot is om directe communicatie tussen A en B mogelijk te maken. De indirecte verbinding legt meteen een belangrijke eigenschap van adhoc-netwerken bloot, namelijk dat elk knooppunt in het netwerk als router fungeert. Elk knooppunt in een adhoc-netwerk kan immers niet enkel eigen informatie ontvangen en verzenden, maar ook informatie die niet bestemd is voor zichzelf doorsturen naar andere knooppunten.

Wanneer de knooppunten in een adhoc-netwerk niet statisch zijn maar zich geografisch bewegen, ontstaat een mobiel adhoc-netwerk (MANET). Mobiele knooppunten zorgen ervoor dat de topologie van het netwerk en bijgevolg ook de link tussen de verschillende knooppunten steeds verandert. Dit maakt de organisatie van zulk netwerk zeer moeilijk. De draadloze communicatie tussen verschillende knooppunten in een MANET gebeurt doorgaans gebruik makend van de IEEE 802.11 communicatiestandaard voor draadloze lokale netwerken (WLAN, *Wireless Local-Area Network*).



Figuur 3: (a) Directe verbinding; (b) indirecte, *multi-hop* verbinding

Vehicle adhoc-netwerken (VANET) vormen een subcategorie van MANETs, waarbij voertuigen de rol innemen van de mobiele knooppunten in het communicatienetwerk (Sago, Shinohara, Hara, & Nishio, 2007). VANETs hebben uiteraard enkele gelijkenissen met MANETs, zoals de lage bandbreedte, tweezijdige communicatie en lage opslagcapaciteit. Toch bieden VANETs enkele nieuwe uitdagingen. Voertuigen verplaatsen zich immers redelijk snel, wat ervoor zorgt dat de topologie van het communicatienetwerk zeer snel verandert. Bovendien bestaat op bepaalde wegen een lage dichtheid van voertuigen wat ervoor zorgt dat zich vele disconnecties van voertuigen voordoen doordat sommige voertuigen of groepen voertuigen zich buiten het zendbereik van anderen bevinden. Bovendien wordt in een VANET zeer veel informatie uitgewisseld, waardoor gegevens gecomprimeerd en geaggregeerd moeten worden om tegemoet te komen aan de lage bandbreedte van het communicatienetwerk. (Dikaiakos, Florides, Nadeem, & Iftode, 2007; Nadeem, Dashtinezhad, Liao, & Iftode, 2004)

Verschillende onderzoekers hebben het verzamelen en verspreiden van dynamische gegevens gebruik makend van VANETs reeds onderzocht. Zo bekijken Briesemeister, Schäfers en Hommel (2000) op welke manier informatiepakketten gedeeld kunnen worden tussen zeer mobiele voertuigen in het geval van kritieke situaties zoals ongevallen. Voertuigen kunnen met behulp van een computergestuurd radiosysteem andere voertuigen in de nabije omgeving contacteren. Een voertuig kan een kritieke situatie onmiddellijk zelf detecteren aan de hand van sensoren, als bijvoorbeeld de airbag van het voertuig geactiveerd wordt. Dankzij de omnidirectionele antenne kan het voertuig het kritieke datapakket doorsturen naar meerdere ontvangers. Dankzij *multi-hopping* kan het kritieke datapakket bovendien verzonden worden tot buiten het zendbereik van de oorspronkelijke zender.

Om datapakketten te verzenden voert elk voertuig het twee-lagig protocol uit dat bestaat uit het *Media Access Control* (MAC) en het algoritme om het datapakket door te sturen. Het doorsturen van een datapakket gebeurt aan de hand van de *Carrier Sense Multiple Access* (CSMA) strategie, waarbij het MAC wacht totdat het zendkanaal vrij is vooraleer het zijn eigen datapakket uitzendt. Indien een zender uiteindelijk een datapakket ontvangt vergelijkt het dit datapakket met een lijst van recent ontvangen datapakketten. Indien het datapakket al in de lijst voor komt, wordt het gewist om te voorkomen dat een pakket eindeloos rondgestuurd wordt door dezelfde zenders. Indien het nieuwe datapakket niet voor komt in de lijst, wordt dit datapakket aan de lijst toegevoegd en wordt het doorgestuurd naar andere voertuigen door middel van *multi-hopping*. (Briesemeister, Schäfers, & Hommel, 2000)

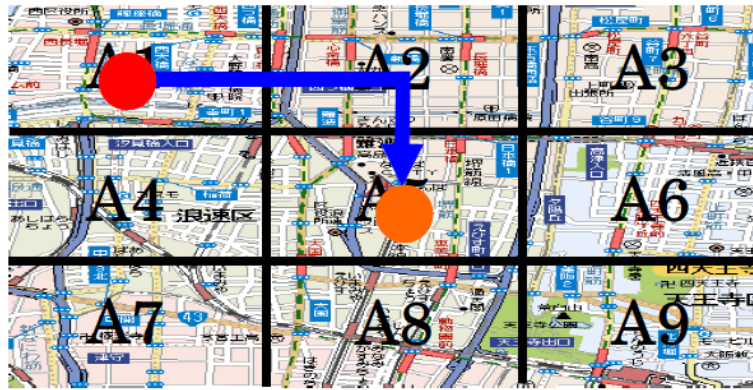
Multi-hopping zorgt dat een ontvanger het pakket niet onmiddellijk doorstuurt naar andere voertuigen maar wacht volgens het wachttijdmechanisme. Dit mechanisme vergelijkt de posities van de zender en ontvangers van een datapakket. De ontvangers die zich het verst van de zender bevinden, krijgen een kortere wachttijd dan diegenen die zich dicht bij de zender bevinden. Op deze manier zullen enkel ontvangers aan de rand van het zendbereik van de zender het datapakket onmiddellijk ontvangen en wordt zo de belasting van het netwerk minimaal gehouden. (Briesemeister, Schäfers, & Hommel, 2000)

De methode van Briesemeister et al. (2000) zorgt dat de kritieke datapakketten enkel doorgestuurd worden naar voertuigen binnen de relevante zone, de zone waarbinnen de kritieke informatie relevant is voor andere bestuurders. Het mechanisme hiervoor is relatief simpel: elk datapakket telt het aantal sprongen, het aantal keren dat het datapakket doorgezonden werd. Indien dit aantal een bepaald maximum overschrijdt, wordt het datapakket niet verder uitgezonden.

Briesemeister et al. (2000) testten hun methode aan de hand van simulaties op twee soorten wegen, wegen met en zonder een middenberm. Dit voor verschillende percentages met het systeem uitgeruste voertuigen. De auteurs komen tot het besluit dat de datapakketten 35% en 49% van de bestemde voertuigen bereikt op respectievelijk een weg met en zonder middenberm indien 5% van de voertuigen uitgerust is met het systeem. Indien echter 20% van de voertuigen uitgerust is met het systeem, bereikt het datapakket meer dan 90% van de bestemde voertuigen. Hierbij duurt het slechts één seconde om het datapakket over een afstand van vijf kilometer door te sturen. De simulaties tonen volgens Briesemeister et al. (2000) aan dat hun systeem in staat is om bestuurders op tijd te informeren over mogelijke gevaarlijke situaties in het verkeer.

Een andere infrastructuurvrije methode wordt behandeld door Shibata et al. (2006). Zij gebruiken V2V communicatie gebaseerd op de IEEE 802.11 standaard om gedurende de rit de tijd van aankomst op de bestemming te schatten. De methode van Shibata et al. (2006) bestaat uit een techniek om verkeersinformatie te verkrijgen gebruik makend van V2V communicatie en een techniek om de reistijd te schatten.

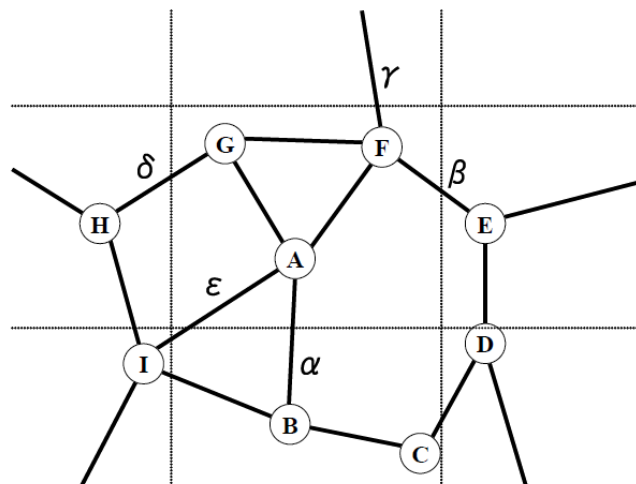
Shibata et al. (2006) veronderstellen dat een digitale wegenkaart voorgesteld kan worden als een grafiek waarbij elk knooppunt en elke link overeenstemt met respectievelijk een kruispunt en de weg tussen twee kruispunten. De digitale wegenkaart wordt ingedeeld in rechthoekige zones, elke zone is even groot en elke zone heeft ook zijn eigen uniek identificatienummer, zoals in Figuur 4. Elke zone heeft linken, wegen, die de zonegrens overschrijden. Deze linken krijgen eveneens een uniek



Figuur 4: De wegenkaart wordt opgedeeld in zones (Shibata, et al., 2006)

identificatienummer toegewezen. De linken waarover een voertuig een zone inrijdt wordt een inkomende link genoemd en die waarover een voertuig een zone uitrijdt een uitgaande link. Elk paar van inkomende en uitgaande linken wordt een linkenpaar genoemd. De doorreistijd van een zone, de tijd die nodig is om een zone volledig te doorkruisen, wordt verzameld voor elk mogelijk linkenpaar. Een voorbeeld hiervan wordt gegeven aan de hand van Figuur 5. Voor de middelste zone in Figuur 5 overschrijden vijf linken de zonegrens, de stippelijijn. Deze linken worden aangeduid met α , β , γ , δ en ϵ . Een voertuig kan de middelste zone enkel doorkruisen indien het twee van deze linken gebruikt. In totaal zijn voor de middelste zone 20 linkenparen mogelijk. Indien een voertuig een zonegrens overschrijdt, onthoudt hij de tijd en het identificatienummer van zijn inkomende en uitgaande link. Het verschil tussen beide tijden vormt de doorreistijd van dat linkenpaar.

Deze informatie moet uiteraard gedeeld worden met andere voertuigen die dezelfde zone zullen doorkruisen. Om deze reden zal elk voertuig zijn doorreistijd delen met de andere voertuigen gebruik makend van V2V communicatie. Het gedeelde datapakket bevat de meettijd, het uur waarop de



Figuur 5: De linken die een zonegrens overschrijden (Shibata, et al., 2006)

meting gebeurde, en de doorreistijd, samen met het identificatienummer van de zone, de inkomende link, de uitgaande link en het voertuig dat de meting uitvoerde. Zo weet elk voertuig dat een datapakket ontvangt om welke zone en welk linkenpaar het gaat en wanneer de doorreistijd berekend werd. Elk voertuig kan de nodige datapakketten gebruiken om zijn aankomsttijd te berekenen. (Shibata, et al., 2006)

Indien een voertuig een datapakket ontvangt, vergelijkt het dit met de datapakketten die het reeds in zijn bezit heeft aan de hand van het voertuigidentificatienummer en de meettijd. Indien blijkt dat het voertuig een gegeven uit dit datapakket reeds bezit, wordt dit niet opnieuw gekopieerd. Op deze manier voorkomen Shibata et al. (2006) dat een voertuig meermaals dezelfde datapakketten opslaat en opneemt in de berekeningen. Indien een voertuig alle datapakketten die het ontvangt ook weer uitzendt, wordt het netwerk erg belast wanneer het voertuig vele datapakketten bezit. Om deze reden stellen Shibata et al. (2006) dat een voertuig een gemiddelde doorreistijd berekent indien het een bepaald aantal, meestal 3 tot 5, datapakketten bezit van hetzelfde linkenpaar. Deze gemiddelde reistijd wordt de zonestatistiek genoemd en wordt in de plaats van de originele datapakketten, die verwijderd worden, opgeslagen en uitgezonden. Hierbij krijgt elke zonestatistiek eveneens een uniek identificatienummer toegekend, gebaseerd op de identificatienummers van de originele datapakketten. Op deze manier kan elk voertuig, net zoals bij de gewone datapakketten, dubbele zonestatistieken verwijderen.

Ondanks de voorgaande methode om dubbele zonestatistieken te voorkomen, kunnen volgens Shibata et al. (2006) toch nog steeds gegevens dubbel meegerekend worden. Dit kan gebeuren indien bijvoorbeeld voertuig A en B dezelfde zonestatistiek ontvangen. Indien beide voertuigen elk van een ander voertuig, A van X en B van Y, een nieuw datapakket ontvangen en deze samenvoegen met hun zonestatistiek, berekenen zowel A en B uit eenzelfde zonestatistiek toch twee verschillende nieuwe zonestatistieken. Indien beide nieuwe zonestatistieken vervolgens samengevoegd worden door een ander voertuig, zal die uiteindelijke zonestatistiek grotendeels op dubbele gegevens gebaseerd zijn. Om deze reden voeren Shibata et al. (2006) een leesinterval in. Gedurende dit leesinterval ontvangt een voertuig alle datapakketten of zonestatistieken zonder ze te analyseren of opnieuw uit te zenden. Indien gedurende dit interval een datapakket of zonestatistiek ontvangen wordt dat het voertuig al in zijn bezit heeft, zullen alle datapakketten en zonestatistieken die ontvangen worden binnen het leesinterval verwijderd worden.

Omdat, omwille van de beperkte bandbreedte van een draadloos netwerk, de datapakketten niet overal tegelijk naartoe gestuurd kunnen worden, hebben Shibata et al. (2006) een methode

ontwikkeld, gebaseerd op de vraag naar informatie over een bepaalde zone. Voertuigen stellen een vraagtabel op bestaande uit de hoeveelheid vraag naar elk paar van zones X en Y, waarbij voertuigen in zone X in de nabije toekomst doorheen zone Y zullen rijden. Alle voertuigen zullen namelijk periodiek hun huidige positie met een opsomming van de nog te doorkruisen zones uitzenden. Indien een voertuig zulke informatie ontvangt, voegt deze de informatie toe aan zijn eigen vraagtabel. Op basis van deze vraagtabel zal de zonestatistiek over een bepaalde zone eerst verzonden worden naar de zones waar veel vraag is naar deze zonestatistiek en daarna pas naar de zones met een lagere vraag naar die zonestatistiek.

In een latere studie hebben Kitani et al. (2008), voortbouwend op het werk van Shibata et al. (2006), een methode ontwikkeld om dode zones binnen het communicatienetwerk te overbruggen. Dode zones ontstaan indien te weinig voertuigen zich op het wegennetwerk begeven om een voortdurende stroom van informatie mogelijk te maken. Een dode zone ontstaat met andere woorden wanneer het zendbereik niet groot genoeg is om de afstand tussen twee voertuigen of groepen te overbruggen. De methode van Kitani et al. (2008) om zulke dode zones te overbruggen maakt gebruik van de *Message Ferrying* techniek waarbij een ferry, in deze methode een autobus, wordt ingeschakeld om informatie door te geven tussen twee voertuigen tussen welke een directe of *multi-hop* verbinding onmogelijk is. In het communicatienetwerk volgens Kitani et al. (2008) worden de knooppunten verdeeld in twee groepen, de gewone knooppunten en de ferryknooppunten. De gewone knooppunten bewegen zich vrij op het wegennet terwijl de ferry's, autobussen, zich bewegen volgens een voorop vastgelegd patroon. De autobussen ontvangen en zenden informatie van en naar andere voertuigen waarna ze zich volgens hun route naar andere losgekoppelde delen van het communicatienetwerk begeven om de informatie verder te verspreiden en andere informatie te ontvangen. Op deze wijze worden de dode zones overbrugd. Bovendien zijn autobussen in staat om een grotere opslagcapaciteit te vervoeren dan gewone voertuigen, waardoor ze zeer geschikt zijn om veel informatie, zoals gegevens van verschillende zones, op te slaan.

In het werk van Kitani et al. (2008) gebeurt de communicatie tussen de verschillende voertuigen nog steeds aan de hand van de methode beschreven door Shibata et al. (2006). Diezelfde methode wordt echter aangepast voor de communicatie tussen voertuigen en autobussen. Om efficiënte informatie-inzameling voor autobussen mogelijk te maken, zenden de autobussen controlepakketten uit naar voertuigen. Deze controlepakketten bevatten alle identificatienummers van de linkparen waarover de autobus al voldoende informatie bezit. De voertuigen die zulke controlepakketten ontvangen, zullen controleren of ze gegevens bezitten over andere linkparen dan vermeld in het controlepakket. Indien de voertuigen zulke gegevens bezitten, zullen deze voertuigen de gegevens

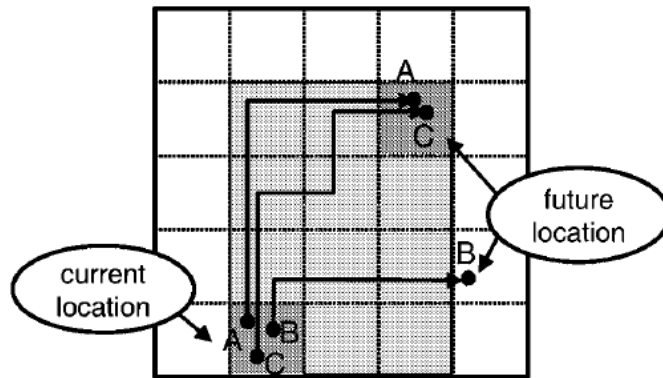
verzenden naar de autobus. Maar eveneens de voertuigen zenden controlepakketten met identificatienummers van de zone waarover hij meer informatie wenst naar de autobus. Indien de autobus deze informatie bezit, wordt deze informatie verzonden naar het vragende voertuig. Experimenten van Kitani et al. (2008) tonen aan dat het gebruik van autobussen als informatieferry's voertuigen beter in staat stelt om stabiele en bruikbare informatie te verzamelen dan bij de methode met enkel voertuigen van Shibata et al. (2006). Bovendien kunnen de dode zones door het gebruik van autobussen overbrugd worden, waardoor meer informatie over een grotere afstand verspreid kan worden. Uiteraard is de methode van Kitani et al. (2008) enkel bruikbaar in gebieden waar autobusroutes gelegen zijn.

Een andere infrastructuurvrije methode om data te verspreiden werd ontwikkeld door Sago, Shinohara, Hara en Nishio (2007). In deze methode wordt eerst de beschikbare connectietijd tussen twee voertuigen berekend. Dit is de tijd die beide voertuigen hebben om met elkaar te communiceren. De auteurs gebruiken de lengte van de route die beide voertuigen overeenkomstig hebben als connectietijd, rekening houdende met de snelheid van beide voertuigen. Hierbij maken de auteurs onderscheid tussen *one-hop* linken en *multi-hop* linken.

Voor een *one-hop* link is de connectietijd gelijk aan de geschatte resterende tijd dat beide voertuigen in elkaars zendbereik zitten. Voor een *multi-hop* link is de connectietijd van twee voertuigen gelijk aan de minimum geschatte resterende connectietijd van twee andere voertuigen die zich tussen beide bevinden. De minimum geschatte resterende connectietijd voor *multi-hop* linken wordt ook wel de padconnectietijd genoemd. Indien meerdere *multi-hop* paden tussen twee voertuigen bestaan, wordt de langste padconnectietijd gekozen. (Sago, Shinohara, Hara, & Nishio, 2007)

Vermits de connectietijd tussen voertuigen eindig is en hierdoor niet alle informatie gedeeld kan worden, moet volgens Sago et al. (2007) de informatie die uitgewisseld wordt nauwkeurig uitgekozen worden. Alle data die een voertuig bezit, wordt daarom beoordeeld op de bruikbaarheid zodat recentere data en data over dichtbij gelegen locaties de grootste bruikbaarheid hebben.

In de methode van Sago et al. (2007) worden voertuigen die zich in elkaars nabijheid bevinden en zich in dezelfde richting begeven, gegroepeerd omdat zulke voertuigen vaak ongeveer dezelfde snelheid en bijgevolg een lange connectietijd hebben. Bovendien is de kans groot dat deze voertuigen ongeveer dezelfde informatie vragen omtrent hun route. Om te bepalen tot welke groep de voertuigen behoren, zal elk voertuig zijn eigen locatie op een toekomstig tijdstip schatten. Hierbij wordt het wegennetwerk in zones opgedeeld en elk voertuig schat zijn toekomstige zone. De



Figuur 6: De huidige en toekomstige zones en groepering van voertuigen (Sago, Shinohara, Hara, & Nishio, 2007)

voertuigen die zowel de huidige zone als de geschatte zone gemeenschappelijk hebben worden gegroepeerd. Zo toont Figuur 6 dat zowel voertuig A, B en C zich in dezelfde huidige zone bevinden en dat voertuigen A en C dezelfde toekomstige zone schatten, anders dan voertuig B. Voertuigen A en C behoren daarom tot één groep.

Vermits voertuigen baat hebben bij de informatie die andere voertuigen in de tegengestelde richting met zich meedragen, zal in de methode van Sago et al. (2007) een voertuig bruikbare data uitwisselen met andere voertuigen die uit de tegengestelde richting komen, rekening houdende met hun groep. Hierbij wordt enkel data betreffende een rechthoekige oppervlakte die de huidige en toekomstige zone bevat, uitgewisseld. In Figuur 6 wordt deze oppervlakte voor A en C aangeduid als een lichtgrijze rechthoek. Daar in tegengestelde richting bewegende voertuigen minder tijd hebben om informatie uit te wisselen dan stilstaande voertuigen beschrijven Sago et al. (2007) twee verschillende methodes om informatie uit te wisselen.

Wanneer de connectietijd kort is, zal de ene groep informatie uitwisselen met voertuigen in de andere groep zonder dubbele informatie te versturen, en omgekeerd. Alvorens de informatieuitwisseling tot stand komt, vergelijken beide groepen de datapakketten die ze bezitten met de datapakketten die de andere groep in zijn bezit heeft. Indien de ene groep datapakketten bezit die de andere groep nog niet bezit, zullen deze datapakketten geordend worden naargelang de bruikbaarheid en klaargemaakt worden om te verzenden. Gedurende de gehele connectietijd zullen datapakketten gedeeld worden tussen de voertuigen van beide groepen. Hierbij wordt elk datapakket slechts éénmaal uitgewisseld tussen beide groepen. Dit wil zeggen dat elk datapakket slechts door één voertuig binnen de hele groep ontvangen wordt. Dit om kostbare connectietijd te sparen en nutteloze dubbele informatieuitwisseling te voorkomen. Nadien, wanneer beide groepen uit elkaars zenbereik zijn, wordt de ontvangen informatie binnen de groep onderling gedeeld. (Sago, Shinohara, Hara, & Nishio, 2007)

Bij een langere connectietijd mag dezelfde informatie wel doorgestuurd worden naar verschillende voertuigen van een groep. Echter, indien de connectietijd lang is en vele datapakketten uitgewisseld worden, wordt het communicatienetwerk erg belast. Om deze reden wordt per groep een leider aangeduid die de informatie-uitwisseling coördineert. Enkel de leiders vergelijken de data van hun eigen groep met die van de andere groepen, door te communiceren met de andere leiders. De leider bekijkt daarna welke informatie die de andere groep bezit nog niet in het bezit is van zijn eigen groep. De leider zal beslissen welke voertuigen uit zijn eigen groep welke informatiepakketten mogen ontvangen van de andere groep en/of versturen naar de andere groep. (Sago, Shinohara, Hara, & Nishio, 2007)

In de methode van Sago et al. (2007) is een voertuig voortdurend op zoek naar recente informatiepakketten die voldoen aan de voorwaarden dat het aantal verkregen datapakketten en de som van de bruikbaarheid van deze datapakketten minimale waarden overschrijden. Elk voertuig kijkt eerst naar de datapakketten dat het al in zijn bezit heeft. Voldoen deze aan de minimale voorwaarden, zal het voertuig geen aanvraag zenden naar andere voertuigen. Voldoen de eigen datapakketten niet aan de voorwaarden, zal het voertuig datapakketten vragen aan andere voertuigen die zich binnen een bepaald aantal sprongen bevinden. Hiervoor zendt het voertuig een vraagpakket met zijn eigen huidige locatie, de route die gevolgd wordt en de locatie waarover hij informatie wenst naar de andere voertuigen. Bij het ontvangen van een vraagpakket controleert elk voertuig of het gegevens bezit over een gebied binnen een bepaalde straal rond de gewenste locatie van het vragende voertuig. Hierna stuurt dit voertuig een antwoordpakket met de toekomstig beschikbare connectietijd, het aantal nodige sprongen en de identificatienummers van de relevante gegevens terug naar het vragende voertuig. Het vragende voertuig dat het antwoordpakket ontvangt zal de identificatienummers controleren. Indien een datapakket beschikbaar is bij het antwoordende voertuig dat het vragende voertuig nog niet bezit, zal het vragende voertuig dit datapakket kopiëren, rekening houdend met de beschikbare connectietijd. Dit proces herhaalt zich tot beide voorwaarden voldaan zijn.

De vele onderzoeken, hierboven aangehaald, handelen over het verzamelen en verspreiden van dynamische verkeersinformatie. Uiteraard is het eveneens mogelijk om andere dynamische gegevens op de verschillende uiteengezette methoden te verspreiden. Zo is het bijvoorbeeld mogelijk dat vrachtwagens met elkaar communiceren over hun lading en de te volgen route. Op deze manier kunnen vrachtwagens met elkaar communiceren om hun ladingen te bundelen op één vrachtwagen om onnodige, inefficiënte en dubbele ritten te voorkomen. Bovendien kunnen nieuwe dynamische gegevens omtrent gewijzigde of nieuwe bestellingen of leveringen doorgegeven worden aan alle

relevante vrachtwagens gebruik makend van de V2V technologie. Hiervoor dienen wel andere elementen van het logistieke netwerk geïntegreerd te worden in het communicatienetwerk. Laad- en losplaatsen of bepaalde afdelingen binnen een onderneming kunnen bijvoorbeeld deze nieuwe dynamische gegevens verschaffen indien ze deel uit maken van het communicatienetwerk. Maar ook ladingen zelf kunnen in een communicatienetwerk geïntegreerd worden. Deze ladingen kunnen dan eveneens dynamische gegevens verzamelen en verspreiden. Bovendien kunnen deze ladingen steeds gemakkelijk hun eigen eigenschappen, zoals inhoud, versheid en uiterste leverdatum doorgeven aan de voertuigen.

Indien zowel laad- en losplaatsen als ladingen geïntegreerd worden in een VANET ontstaat een zeer breed communicatienetwerk waarin de verspreiding van alle soorten dynamische gegevens mogelijk wordt. Hierbij dient wel gesteld dat indien laad- en losplaatsen of andere gebouwen geïntegreerd worden in een VANET, louter theoretisch niet meer gesproken kan worden van een *vehicle* adhoc-netwerk. Het netwerk bestaat dan immers niet enkel uit voertuigen en is bovendien niet zuiver mobiel en infrastructuurvrij door de immobiele en vaste infrastructuur van de geïntegreerde gebouwen. Om deze reden wordt de integratie van gebouwen in VANETs verder besproken in hoofdstuk 2.4.

De integratie van ladingen en goederen in een VANET verandert daarentegen nauwelijks het concept van VANETs. Net zoals voertuigen zijn ladingen en goederen namelijk eveneens mobiele objecten binnen het logistieke netwerk. Ze worden getransporteerd van de ene naar de andere plaats. Echter kan de integratie van ladingen en goederen in een VANET weinig bijbrengen aan de functionering van de verzameling van dynamische gegevens binnen het netwerk. Ladingen worden immers steeds vervoerd door voertuigen die reeds deel uit maken van het VANET. De gegevens die een voertuig en zijn lading verzamelen zullen bijgevolg steeds identiek zijn. Hierdoor ontstaan meervoudig dubbele gegevens die bij de analyse en de verspreiding van de dynamische gegevens opnieuw uitgefilterd zullen worden, zoals hierboven in de methode van Shibata et al. (2006) reeds aangetoond werd.

Toch kan de integratie van ladingen in VANETs een bijdrage leveren aan de efficiëntie van het communicatienetwerk. Ladingen kunnen immers informatie over zichzelf doorgeven aan voertuigen. Wycisk, McKelvey en Hülsmann (2008) vermelden bijvoorbeeld het gebruik van slimme chips op goederen. Deze slimme chips zijn in staat om alle gegevens omtrent het goed op te slaan en te verspreiden. De slimme chips op goederen kunnen gemakkelijk draadloos contact maken met de voertuigen en andere goederen. Zo kunnen ze gegevens over zichzelf, aangaande de houdbaarheid van het goed, de uiterste leverdatum, de inhoud, de temperatuur, enzovoort doorgeven aan het

transportvoertuig. Op deze manier worden de dynamische gegevens van de goederen geïncorporeerd met andere dynamische gegevens om een optimale rittenplanning te berekenen. Indien bijvoorbeeld de versheid van bepaalde levensmiddelen in een transportvoertuig onverwacht snel daalt, kan het noodzakelijk zijn dat deze levensmiddelen eerst geleverd moeten worden vooraleer de overige lading geleverd wordt. De incorporatie van zulke dynamische gegevens kan een positief effect hebben op de optimalisering van rittenplanning.

Maar ook voor de verspreiding van dynamische gegevens kan de integratie van ladingen in een VANET positief zijn. Het hierboven besproken werk van Sago, Shinohara, Hara en Nishio (2007) toonde immers reeds dat indien twee groepen van voertuigen een korte connectietijd hebben om informatie te delen, het best gewerkt wordt volgens een vooropgesteld schema voor informatie-uitwisseling. Dit om te voorkomen dat informatie dubbel gedeeld wordt en bijgevolg kostbare connectietijd verloren gaat aan het versturen en ontvangen van dubbele gegevens. In dit opzicht kunnen ladingen een belangrijke rol spelen om de connectietijd tussen twee groepen voertuigen optimaal te benutten. De slimme chips van de ladingen worden in dat geval niet enkel gebruikt om dynamische gegevens over zichzelf door te geven aan de voertuigen. Ze zullen immers een beperkte hoeveelheid dynamische gegevens die het voertuig reeds bezit, opslaan. Indien de connectietijd tussen twee groepen kort is, kunnen de ladingen geïntegreerd worden in het schema voor informatie-uitwisseling. Op deze wijze delen ook ladingen een beperkte hoeveelheid informatie met elkaar, waardoor een veel grotere hoeveelheid informatie gedeeld kan worden gedurende de korte connectietijd. Uiteraard zullen de ladingen enkel in het communicatienetwerk geïntegreerd worden in geval van een korte connectietijd en een korte communicatieafstand. Anders zou de communicatie van de ladingen enkel zorgen voor een nog grotere belasting van het communicatienetwerk, daar de belasting toch vaak een probleem vormt bij draadloze communicatie in VANETs (Briesemeister, Schäfers, & Hommel, 2000; Shibata, et al., 2006).

2.3 Infrastructuurgebaseerde methoden

Infrastructuurgebaseerde methoden worden gekenmerkt door de noodzaak aan vaste infrastructuur, vaak ingebed in de weginfrastructuur. Zo behoren scanners, meetinstallaties en zendmasten tot deze categorie. Een ander kenmerk is het gebruik van een achterliggend communicatienetwerk dat contact maakt met een, eventueel centraal, informatiecentrum om gegevens te verzamelen, te analyseren en verder te verspreiden. Bovendien wordt de nadruk veelal gelegd op eenzijdige communicatie, dit is communicatie die van het voertuig naar het informatiecentrum loopt. Weinige onderzoeken richten zich op infrastructuurgebaseerde methoden die tweezijdige communicatie voeren.

In de volgende secties worden enkele conventionele en vernieuwende infrastructuurgebaseerde methoden behandeld. Hierbij wordt eveneens voor elke methode bekeken welke andere toepassingen de besproken technologie kan vervullen aangaande het verzamelen van dynamische gegevens.

2.3.1 Conventionele Methoden

Sinds lang wordt verkeersinformatie verzameld door middel van enkele conventionele, ingeburgerde methoden. Dit deel handelt over enkele van deze conventionele methoden die veelal in het straatbeeld terug te vinden zijn.

Een eerste en meest gebruikte methode om verkeersinformatie te verzamelen betreft magnetische inductielussen. Deze lussen worden, meestal in een vierhoekige vorm, in het wegdek ingewerkt. De inductielussen vormen een magnetisch veld dat verstoord wordt indien een voertuig zich over de inductielus begeeft. Deze storing in het magnetisch veld wordt gedetecteerd door sensoren. Aan de hand van het aantal storingen kan uiteraard een verkeerstelling gedaan worden. Ook kan de snelheid van het voorbijrijdende voertuig gemeten worden. Deze laatste eigenschap zorgt eveneens dat inductielussen gebruikt kunnen worden bij de werking van flitspalen. De inductielussen worden bovendien ook gebruikt om verkeerslichten erop te duiden dat zich wachtende voertuigen bevinden op de rijstroken die op dat ogenblik rood licht hebben. Doordat de inductielussen in het wegdek ingebouwd worden kunnen ze echter beschadigd raken door zwaar vrachtverkeer, wat een nadeel

vormt van deze verzamelmethode. Bovendien kunnen de implementatie- en onderhoudskosten hoog oplopen. (Leduc, 2008)

Een andere veelgebruikte methode maakt gebruik van pneumatische buizen. Deze buizen worden over het wegdek gelegd. Voertuigen die over deze pneumatische buizen rijden, veroorzaken een drukverandering in de buis wat op zijn beurt een luchtimpuls genereert die gedetecteerd wordt door sensoren. De pneumatische buizen kunnen echter enkel gebruikt worden voor voertuigtellingen en zijn onderhevig aan het weer en de temperatuur. Een modernere versie van de pneumatische buizen zijn de piëzo-elektrische sensoren. Deze sensoren worden ingeslepen in het wegdek en zetten mechanische energie om in elektrische energie. Indien een voertuig over de sensor rijdt, vervormt het piëzo-elektrische materiaal. Dit wijzigt de ladingsdichtheid van het materiaal wat zorgt voor een potentiaalverschil tussen de elektroden. Dit potentiaalverschil wordt gedetecteerd door sensoren, wat verkeerstellingen mogelijk maakt. De piëzo-elektrische sensoren zijn minder onderhevig aan het weer en de temperatuur dan pneumatische buizen, waardoor deze sensoren gebruiksvriendelijker zijn. (Leduc, 2008)

Infraroodsensoren worden eveneens gebruikt voor het verzamelen van verkeersinformatie. Deze sensoren meten de aanwezigheid, snelheid en type van het voertuig wanneer deze de infrarode lichtbundel onderbreekt. Een ander type sensor is de magnetische sensor, die onder of op het wegdek geïnstalleerd worden en voorbijrijdende voertuigen detecteert. Microgolf radars detecteren dan weer voertuigen doordat de uitgestraalde microgolven teruggekaatst worden. Ultrasonische detectoren sturen geluidsgolven uit die weerkaatst worden door objecten en voertuigen. Camera's ten slotte worden eveneens gebruikt voor informatieverzameling. De camera's filmen een bepaald stuk wegdek, waarna mensen of computerprogramma's de beelden analyseren. (Leduc, 2008)

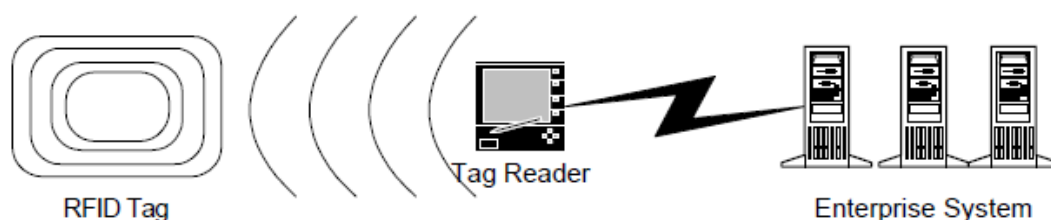
Bij de conventionele methoden dient opgemerkt te worden dat deze enkel gebruikt kunnen worden om verkeersinformatie, of eventuele andere informatie te verzamelen. Bij de conventionele methoden is het niet mogelijk om tweezijdige communicatie te voeren. De communicatie bij deze methoden loopt immers enkel van het voertuig naar de sensoren, detectoren en camera's. Het is namelijk het voertuig dat bijvoorbeeld zijn aanwezigheid doorgeeft aan de sensoren. Communicatie van het voertuig naar de sensoren, detectoren of camera's is onmogelijk. Vooral om deze reden zijn de conventionele methoden uiterst ongeschikt om informatie tussen verschillende voertuigen te delen. Enkel de verkeersinformatie die deze conventionele methoden verzamelen kan gebruikt worden voor het voeren van een gedistribueerde aanpak voor de rittenplanning in logistieke netwerken.

2.3.2 Radio Frequency Identification

Radio Frequency Identification (RFID) is een systeem gebaseerd op infrastructuur dat de identiteit van een object of persoon draadloos uitzendt met behulp van radiogolven. Een typisch systeem bestaat uit een transponder en een lezer. De transponder, ook wel label genoemd, bestaat uit een microchip uitgerust met een antenne. De lezer kan met behulp van radiogolven via zijn eigen antennes de gegevens op de transponder lezen en zo overbrengen naar een computer of een database, zoals weergegeven in Figuur 7. (RFID Journal LLC; Roberts, 2006)

Er bestaan twee RFID-systemen, namelijk passieve en actieve systemen. Een actief RFID-systeem maakt gebruik van actieve transponders. Deze bezitten een zender en een energiebron. De lezer geeft de actieve transponder een signaal als deze contact wil leggen. De actieve transponder treedt hierbij in actie, en stuurt zelf gebruik makend van radiogolven de informatie naar de lezer. Het is de transponder zelf die de informatie naar de lezer zendt. Actieve RFID-systemen hebben een leesbereik van 20 tot 100 meter. Doordat de actieve transponders een eigen energiebron en zender nodig hebben, zijn ze redelijk duur, tot 30 euro per stuk. Bovendien zorgt het gebruik van een energiebron, meestal een batterij, ervoor dat de actieve transponder een beperkte levensduur heeft en/of onderhoud vraagt. (RFID Journal LLC; Roberts, 2006)

Passieve RFID-systemen maken gebruik van passieve transponders, die geen energiebron nodig hebben, waardoor ze ook veel goedkoper zijn dan de actieve transponders, namelijk 20 eurocent per stuk. Wanneer een passieve transponder binnen het bereik van een lezer komt, ontvangt de transponder een elektromagnetisch signaal. Deze energie wordt opgeslagen in een condensator in de transponder. Wanneer voldoende energie opgeslagen is, kan de passieve transponder een signaal uitzenden, wat opgevangen wordt door de lezer. Op deze manier wordt de informatie van de transponder overgebracht naar de lezer. Een voordeel van passieve transponders is dat deze geen onderhoud nodig hebben. Echter heeft een passief RFID-systeem een leesbereik van maximum 10 meter, korter dan een actief systeem. (RFID Journal LLC; Weinstein, 2005)



Figuur 7: Weergave van een RFID-systeem (Roberts, 2006)

Wen (2010) gebruikt zulke RFID technologie in zijn intelligent deskundig verkeersmanagement systeem. Dit verkeersmanagement systeem gebruikt passieve RFID labels en RFID lezers om verkeersinformatie te verzamelen. Elk voertuig wordt uitgerust met een RFID label, dat gelezen kan worden door de RFID lezers ingebouwd in de weginfrastructuur. Deze lezers zijn via een draadloos netwerk verbonden met een database. De database houdt alle verzamelde gegevens bij, en analyseert ze. Op deze manier kan van elk voertuig gemakkelijk de gemiddelde snelheid gemeten worden. Echter kan met dit systeem niet enkel de gemiddelde snelheid gelezen worden, maar ook andere informatie die in het RFID label opgeslagen is, zoals nummerplaat, verzekeringspolis, tolbetalingen, wegenbelasting, enzovoort. Op deze manier kunnen de bevoegde instanties gemakkelijk overtreders beboeten of opsporen. Zulk systeem kan ook gebruikt worden om algemene verkeersinformatie te verzamelen. Zo kan de gemiddelde snelheid van voertuigen op een bepaalde weg aangeven of zich al dan niet een congestieprobleem voordoet. Ook gegevens over het aantal voertuigen op een bepaald stuk weg kan waardevolle informatie geven over de verkeerstoestand.

Het integreren van RFID-lezers in de straatkant of het wegdek biedt bovendien nog een andere interessante toepassing. De lezers zijn immers in staat om de RFID-labels te herschrijven. Met andere woorden kan een lezer informatie toevoegen aan, opslaan op de label. Op deze manier kan een lezer zowel informatie ontvangen van de label als informatie verzenden naar de label. De lezers zullen hiervoor verbonden moeten zijn met een communicatienetwerk via welke ze de van de labels verkregen informatie verder versturen naar de nodige databases en/of via welke ze de naar de labels te sturen informatie ontvangen van bepaalde databases. Op deze wijze ontstaat een tweezijdige communicatie, dat een gedistribueerde aanpak van rittenplanning mogelijk maakt. De voertuigen kunnen op deze manier immers informatie uitwisselen met elkaar en met databases. De voertuigen beschikken zo steeds over de nodige informatie om hun berekeningen en beslissingen op te baseren.

2.3.3 Global Positioning System

Apparaten met een *Global Positioning System* (GPS) worden gebruikt om te navigeren. Maar GPS-apparaten kunnen eveneens gebruikt worden om de positie van een voertuig te controleren, om de bezochte coördinaten bij te houden, om een spoor te registreren en om data te converteren naar informatie over het dynamische gedrag van voertuigen. (Covaciu, Florea, Preda, & Timar, 2008)

Covaciu et al. (2008) ontwikkelden een computerprogramma om verkeersdata te onttrekken uit de gegevens die GPS-apparaten verzamelen. Ze voorzien een voertuig van een GPS-apparaat en volgen een voorop vastgelegde route waarover verkeersdata verzameld dient te worden. Gedurende de gehele route verzamelt het GPS-apparaat periodiek gegevens omtrent lengtegraad, breedtegraad, hoogte en tijd. Deze gegevens worden opgeslaan en nadien geëxporteerd naar een computer, waarna het computerprogramma met al deze gegevens aan de slag kan. Gegevens omtrent lengtegraad, breedtegraad, hoogte en tijd worden voor elk punt omgevormd tot x,y,z-coördinaten waarna elk punt op een digitale kaart weergegeven wordt. Op deze manier is het mogelijk om de afstand tussen twee punten te meten. Aan de hand van de afstand en het tijdsverschil tussen twee punten kan dan de gemiddelde snelheid berekend worden. Niet alleen de gemiddelde snelheid, maar ook de versnelling kan berekend worden gebruik makend van de gegevens die de GPS-apparaten voorzien. Bovendien kan ook de verkeersdruk op bepaalde tijdstippen geschat worden aan de hand van de gemiddelde snelheid. Eveneens kan op deze manier de tijd berekend worden die nodig is om aan te schuiven aan een kruispunt. Covaciu et al. (2008) halen echter zelf al aan dat het op deze wijze onttrekken van verkeersdata niet nauwkeurig is.

Ook (Tong, Merry, & Coifman, 2006) gebruiken GPS-apparaten om verkeersinformatie te verkrijgen. Tong et al. (2006) maken hiervoor eveneens gebruik van een voertuig, uitgerust met een GPS-apparaat, dat een vooropgestelde route volgt om gegevens te verzamelen. De gevolgde route wordt gedigitaliseerd, waarna de GPS-punten verkregen van het GPS-apparaat op deze digitale weergave van de route geprojecteerd worden. De gevolgde route wordt eveneens in segmenten opgedeeld om alle GPS-punten binnen één segment samen te voegen.

Tong et al. (2006) vergelijken de door hun systeem berekende gegevens met gegevens verzameld via andere methoden. Zo vergelijken ze de snelheid berekend door hun GPS-systeem met de snelheid vastgelegd door lusedetectoren in het wegdek. Ze komen tot het besluit dat het maximale verschil tussen de snelheden relatief klein blijft, waardoor hun eigen systeem betrouwbaar genoemd mag worden. Via het systeem van Tong et al. (2006) is het eveneens mogelijk om te bepalen in welke

rijstrook een voertuig zich bevindt door de afstand te berekenen tussen het midden van het wegdek en de positie van een GPS-punt. Tong et al. (2006) vergelijken hier de berekende rijstrook met de reële rijstrook van het voertuig, zoals genoteerd door de bestuurder. Ze komen tot het besluit dat in open vlaktes de berekende rijstrook exact overeenstemt met de reële rijstrook van het voertuig, maar moeten eveneens besluiten dat het voorspellen van de rijstrook niet gemakkelijk en efficiënt is als het voertuig zich in dichtbebouwde gebieden begeeft. Dichtbebouwde gebieden kunnen immers de GPS-signalen verstoren waardoor de nauwkeurigheid afneemt. Het systeem van Tong et al. (2006) kan eveneens de verkeersdrukke of verkeerscongestie berekenen aan de hand van de gemiddelde snelheid van het voertuig.

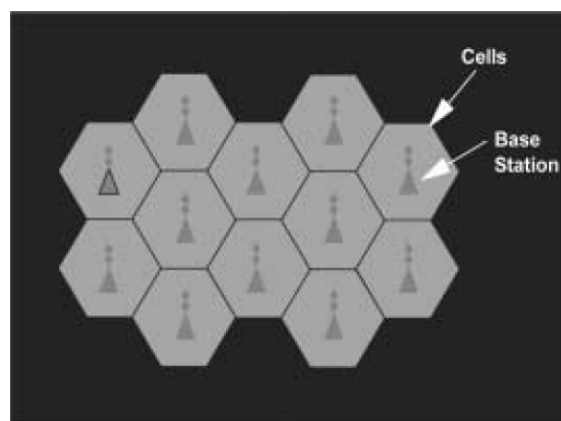
De dynamische gegevens die verzameld worden met behulp van *global positioning systems* betreft, zoals reeds aangegeven, enkel verkeersinformatie. *Global positioning systems* kunnen noch direct noch indirect andere dynamische gegevens verschaffen dan de positie van voertuigen of ladingen. Bovendien dient opgemerkt te worden dat de systemen van Covaciu et al. (2008) en Tong et al. (2006) niet rechtstreeks in staat zijn om real-time dynamische gegevens te verschaffen. Bij beide systemen worden de dynamische gegevens eerst op een plaatselijke harde schijf opgeslagen, om deze gegevens nadien in te lezen op een krachtigere computer die de gegevens nadien kan analyseren. Er zit met andere woorden steeds een vertraging tussen het verzamelen van de dynamische gegevens en het analyseren van deze gegevens. In dit opzicht zijn beide systemen niet rechtstreeks bruikbaar voor het verzamelen en verspreiden van actuele dynamische gegevens. Om beide systemen bruikbaar te maken voor de gedistribueerde aanpak van rittenplanning dienen beide systemen uitgerust te worden met een draadloze communicatiemogelijkheid. Indien de systemen namelijk hun net verzamelde gegevens onmiddellijk kunnen doorcommuniceren naar andere voertuigen of instanties door middel van draadloze communicatie, kunnen ze waardevolle verkeersinformatie verschaffen. Mits het toevoegen van een draadloos communicatienetwerk zijn de systemen van Covaciu et al. (2008) en Tong et al. (2006) wel bruikbaar voor het voeren van een gedistribueerde aanpak van rittenplanning.

2.3.4 Mobiele Telefontie

Het mobiele telefoonnetwerk kan gebruikt worden om verkeersinformatie te onttrekken uit de signalen die de mobiele telefoons uitzenden. Het gebruik maken van mobiele telefonie voor gegevensverzameling heeft alvast een groot voordeel: de infrastructuur die nodig is, is in een groot gedeelte van de wereld aanwezig en bovendien bezitten de meeste bestuurders of passagiers een mobiele telefoon. (Rose, 2006; Hsiao & Chang, 2005)

In een mobiel telefoonnetwerk communiceert elke actieve mobiele telefoon met het dichtstbijzijnde basisstation. Elk basisstation heeft zijn eigen cirkelvormige reikwijdte. Om de overlapping tussen de cirkelvormige reikwijdtes van de verschillende basisstations te voorkomen, wordt de reikwijdte van elk basisstation omgevormd tot een zeshoek, cel genaamd. Op deze manier kan een groot gebied opgedeeld worden in cellen, met elk hun basisstation (Figuur 8). Indien een mobiele telefoon verbonden is met een basisstation, maar zich buiten de cel van dat basisstation begeeft, wordt de connectie overgedragen aan het volgende dichtstbijzijnde basisstation. Zolang de mobiele telefoon ingeschakeld is, wordt de locatie periodiek gerapporteerd aan het basisstation. Om contact te leggen met het basisstation hoeft de gebruiker niet te bellen of berichten te sturen. Dit vormt uiteraard een groot pluspunt voor het verzamelen en berekenen van verkeersinformatie. (Rose, 2006)

Hsiao en Chang (2005) splitsen het verkrijgen van verkeersinformatie via het gebruik van mobiele telefoonnetwerken op in twee subsystemen. Het eerste subsysteem positioneert de mobiele telefoon, en zijn gebruiker, en kent geografische coördinaten toe aan de locatie. Het tweede subsysteem schat de verkeersinformatie door de geografische coördinaten om te zetten in ruimtelijke locaties op het wegennetwerk en berekeningen uit te voeren met deze gegevens. Het gehele proces voor het verkrijgen van verkeersinformatie gebruik makend van mobiele

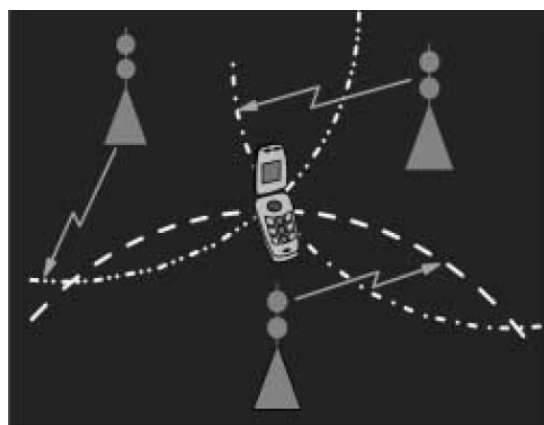


Figuur 8: Basisstations en hun cellen (Rose, 2006)

telefoonnetwerken, dat beide subsystemen omvat, kan volgens Hsiao en Chang (2005) opgedeeld worden in vijf stappen. In de eerste stap worden de data verzameld en worden de posities bepaald, gebruik makend van passieve en actieve deelnemers. De mobiele telefoons van de passieve deelnemers versturen periodiek een datarapport dat gebruikt wordt om normale verkeersinformatie te berekenen. De actieve deelnemers sturen op willekeurige tijdstippen een datarapport met betrekking tot filevorming en incidenten die zich voordoen.

De tweede stap volgens Hsiao en Chang (2005) betreft de positionering van de mobiele telefoons. Aan de hand van de verkregen datapakketten zal een computersysteem de locatie van de mobiele telefoon op een digitale wegenkaart trachten vast te leggen. Dit kan gebeuren door rekening te houden met de eigenschappen van de verschillende wegen. Zo is het abnormaal dat een deelnemer, mobiele telefoon, die zich op een autosnelweg begeeft vele stopmanoeuvres maakt, terwijl dit op een straat in de stad, waar vele kruispunten zijn, normaal is. Zulke eigenschappen van wegen kunnen helpen bij het bepalen van de exacte positie van de deelnemer. Deze stap analyseert echter alle mobiele telefoons, ook van de deelnemers die zich niet in een gemotoriseerd voertuig op het wegennet bevinden, zoals bijvoorbeeld een voetganger of een fietser, of van deelnemers die zich in één en hetzelfde voertuig bevinden. Daarom worden in stap drie alle datapakketten van niet-gemotoriseerde voertuigen uit de database gefilterd en worden de datapakketten van deelnemers die zich in één en hetzelfde voertuig bevinden gebundeld tot één datapakket.

In de vierde stap wordt gebruik makend van alle datapakketten, overgebleven na de derde stap, een schatting gemaakt van de verkeersinformatie zoals reistijd, snelheid en speciale incidenten zoals filevorming. Hierna wordt in stap vijf de geschatte verkeersinformatie geverifieerd aan de hand van verschillende criteria. Indien nodig zorgt stap vijf ook voor feedback. (Hsiao & Chang, 2005)

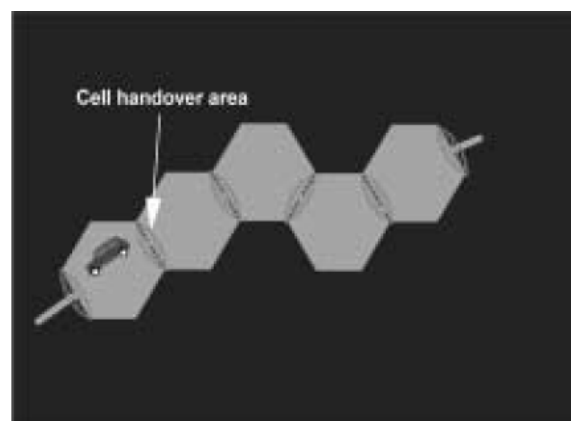


Figuur 9: Trilateratie met signaalsterkte (Rose, 2006)

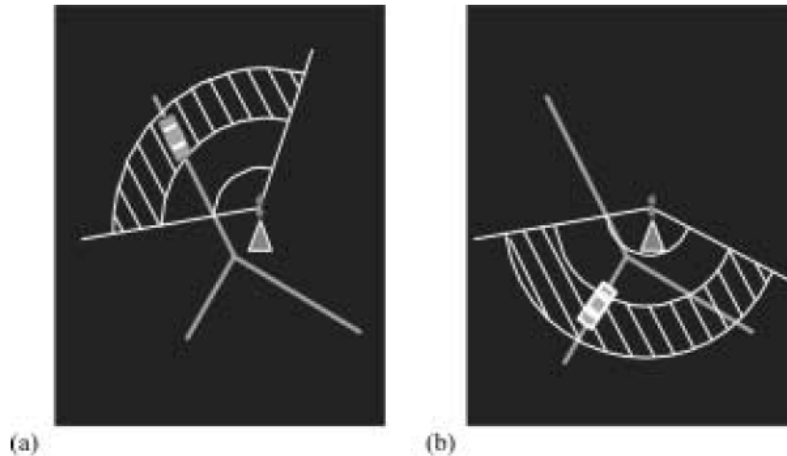
Rose (2006) stelt dat twee technologieën bestaan om de positionering van mobiele telefoons, de eerste, tweede en derde stap van het gehele proces, te bepalen, namelijk een netwerkgebaseerde oplossing en een toestelgebaseerde oplossing. De netwerkgebaseerde oplossing gebruikt een intelligent netwerk en gegevensoverdracht, zoals bij netwerken voor mobiele telefonie. Een kleine hardwareaanpassing om de door het mobiele telefoonnetwerk verzamelde data te gebruiken voor het verzamelen van verkeersgegevens is alles wat nodig is om een netwerkgebaseerde oplossing mogelijk te maken. De locatie van een mobiele telefoon kan achterhaald worden door trilateratie met signaalsterkte of transmissievertraging van meerdere basisstations (Figuur 9). Indien de tijd en afstand tussen twee posities van een mobiele telefoon, gebruiker, gemeten wordt, kan de gemiddelde snelheid van de gebruiker berekend worden, wat toebehoort aan de vierde stap van het gehele proces volgens Hsiao en Chang (2005).

Een alternatieve aanpak die Rose (2006) aanhaalt voor het schatten van verkeersinformatie betreft het vergelijken van de tijdstippen waarop een mobiele telefoon, gebruiker, van cel wisselt. Een weg, en bijgevolg ook de gebruiker op die weg, kruist de celgrens op een vaste, gekende, locatie. Op deze manier kunnen de exacte tijdstippen achterhaald worden waarop de gebruiker zich op een exact gekende locatie bevindt. Op deze manier kan de gemiddelde snelheid van een gebruiker nauwkeurig berekend worden. (Figuur 10).

Er is echter nog een derde aanpak die Rose (2006) aanhaalt, namelijk *Timing Advance (TA)*. *Timing Advance* stelt het netwerk in staat de onnauwkeurigheid te compenseren die ontstaat door de afstand tussen de mobiele telefoon en het basisstation. De TA-informatie kan gebruikt worden om de locatie van een mobiele telefoon te begrenzen tot een 550 meter brede concentrische band, uitgestraald vanaf het basisstation. Indien deze concentrische band gefixeerd wordt op een digitale wegkaart, kan de exacte locatie van een voertuig bepaald worden (Figuur 11 (a)). Na verloop van



Figuur 10: Voertuig dat celgrenzen doorkruist (Rose, 2006)



Figuur 11: (a) *Timing Advance* met fixatie op een digitale kaart; (b) Na verloop van tijd kunnen ook de route en snelheid van het voertuig berekend worden.

tijd kan de informatie verkregen van verschillende kwadranten van de cel, doorheen welke de gebruiker zich begeeft, gebruikt worden om de route die een gebruiker volgt en zijn gemiddelde snelheid te berekenen (Figuur 11(b)).

Mede door de onnauwkeurigheid van de positiebepaling van mobiele telefoons stellen Hsiao en Chang (2005) nog een andere methode, de segmentgebaseerde methode, voor. Hierbij worden de wegen opgedeeld in segmenten. Elk voertuig wordt aan de hand van zijn, onnauwkeurig, bepaalde locatie toegewezen aan een segment. De opeenvolgende datapakketten van elk segment worden gezamenlijk geanalyseerd om zo nauwkeurig mogelijke informatie te verkrijgen van het gehele segment. Op deze manier kan de nauwkeurigheid en stabiliteit van de verkeersinformatie verbeterd worden. (Hsiao & Chang, 2005)

Tot nu toe werden netwerkgebaseerde oplossingen aangehaald, deze oplossingen zijn echter vaak niet nauwkeurig (Hsiao & Chang, 2005; Rose, 2006). In tegenstelling tot deze netwerkgebaseerde oplossingen, die enkel gebruik maken van het netwerk en de aanwezige signalen, vertrouwt de toestelgebaseerde oplossing op additionele technologieën die geïntegreerd zijn in de mobiele telefoon, zoals een GPS ontvanger. Gebruik makend van deze geïntegreerde technologie kan de locatie van de mobiele telefoon en van de gebruiker, periodiek via *Short Messaging Service* (SMS) verstuurd worden over het mobiele telefoonnetwerk. Zulk systeem kan de locatie van de mobiele telefoon en de gebruiker, nauwkeuriger vastleggen. Echter vormt de kost van de SMS om zijn locatie door te geven een nadeel. Bovendien bevat elke verzonden SMS een identificatienummer van de mobiele telefoon en kan deze gelinkt worden aan individuele personen, wat als een inbreuk op de privacy gezien kan worden. (Rose, 2006; Hoh et al. 2008)

Hoh et al. (2008) stellen dat het gebruik van *Virtual Trip Lines* (VTLs) een oplossing kan bieden voor de inbreuk op de privacy en bovendien de kwaliteit van de verzamelde data kan verbeteren. Een VTL is een denkbeeldige lijn die dwars over de weg getrokken wordt tussen twee GPS-coördinaten. Telkens de mobiele telefoon met een geïntegreerde GPS een VTL kruist, zal deze zijn positie, snelheid en richting anoniem doorsturen. Het doorsturen van de positie gebeurt niet meer periodiek zoals in het systeem van Rose (2006) en is bovendien anoniem. Zo wordt data verzameld per VTL, die elk hun eigen identificatienummer hebben. Een groot voordeel hiervan is dat informatie verzameld wordt over vooropgestelde geografische punten. Het computersysteem zal hierdoor geen gegevens ontvangen over oneindig veel coördinaten, zoals bij periodieke zendingen (Rose, 2006), maar enkel over de vooropgestelde coördinaten van de VTLs. Bovendien kunnen de mobiele telefoons eveneens hun reistijd meten tussen twee VTLs en deze mee doorsturen met de positie, waardoor informatie verkregen wordt over wegsegmenten tussen twee of meerdere VTLs. Indien de VTLs strategisch geplaatst worden, kan op deze manier kwalitatieve informatie verzameld worden. (Hoh, et al., 2008; Herrera, et al., 2010)

De hierboven besproken technologie van Hsiao en Chang (2005) en Rose (2006) die gebruik maakt van de signalen die mobiele telefoons uitzenden kent echter een groot nadeel voor het gebruik voor een gedistribueerde aanpak van rittenplanning. Daar deze technologie gebruik maakt van reeds bestaande signalen van mobiele telefoons, wordt het zeer moeilijk om andere dynamische gegevens dan de geografische locatie toe te voegen. Hierdoor is deze technologie enkel bruikbaar om verkeersinformatie te onttrekken uit het mobiele telefoonnetwerk. Dynamische gegevens over ladingen, routes, leveringen en bestellingen kunnen hierdoor niet op deze wijze gecommuniceerd worden. Bovendien is tweezijdige communicatie gebruik makend van de signalen die mobiele telefoons uitzenden eveneens onmogelijk. Doordat de werkwijze van Hoh et al. (2008) en Herrera et al. (2010) gebruik maakt van SMS, is hier wel een mogelijkheid tot het incorporeren van andere dynamische gegevens aangaande ladingen, routes, leveringen en bestellingen. Bovendien biedt dit systeem de mogelijkheid tot tweezijdige communicatie, daar de mobiele telefoons van de bestuurders ook een SMS kunnen ontvangen met allerhande dynamische gegevens. De boordcomputer in het voertuig kan elke SMS automatisch inlezen in het systeem en kan ook zelf een SMS versturen, zonder tussenkomst van de bestuurder. Toch lijkt een systeem dat werkt met SMS niet aangeraden daar zulk systeem een grote netwerkcapaciteit vraagt.

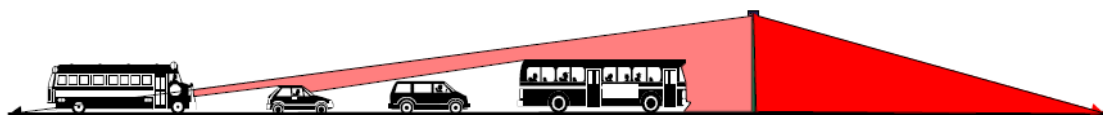
2.3.5 Andere methoden

Er bestaan nog enkele andere manieren waarop dynamische gegevens verzameld en verspreid kunnen worden. Zo hebben Wycisk, McKelvey en Hülsmann (2008) het in hun werk over complexe aanpasbare logistische systemen. Deze systemen maken gebruik van slimme chips in producten of voorwerpen binnen de gehele toeleveringsketen. Zulke slimme chip weet waar het product in kwestie naartoe moet, kan contact leggen met GPS-satellieten om zijn exacte positie te bepalen, kan transportmiddelen zoals vrachtwagens en treinen contacteren en kan zichzelf localiseren binnen grote opslagplaatsen. De slimme chip vormt alles binnen de toeleveringsketen, gaande van grondstoffen over afgewerkte producten tot verpakkingsmaterialen, om tot slimme onderdelen. Een slim onderdeel wordt in staat gesteld om zelf zijn optimale route te bepalen van de verzender tot de ontvanger. Verder stellen Wycisk et al. (2008) dat indien de slimme chips een lerend vermogen bezitten, de chips kunnen leren van elkaar en zo een geheel zelf-organiserend systeem kunnen vormen, dat zich kan aanpassen aan dynamische omstandigheden.

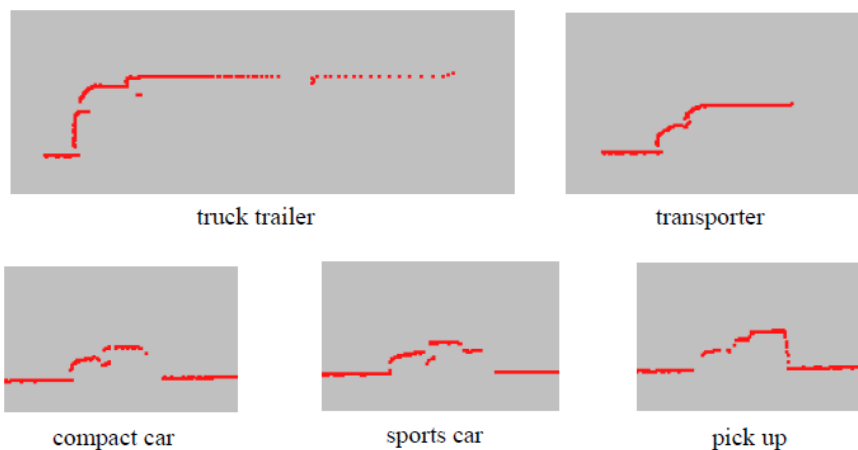
Uiteraard is het reeds duidelijk dat zulke slimme onderdelen vrachtwagens kan helpen in het maken van beslissingen omtrent hun route en lading. Een slim onderdeel kan namelijk zelf vrachtwagens contacteren en begeleiden doorheen hun traject. Indien de slimme, lerende, onderdelen zelfs een zelforganiserend systeem vormen, kunnen ze, indien samen getransporteerd, een optimaal traject voor de vrachtwagen uitstippelen waarbij rekening gehouden wordt met dynamische factoren zoals levertijden, wijzigingen in orders en verkeerstoestanden.

Een andere methode om dynamische gegevens te verzamelen betreft het gebruik van laserscanners (Fürstenberg, Hipp, & Liebram, 2000). In hun werk behandelen Fürstenberg et al. (2000) de IBEO LD laser scanner die in staat is om verkeersinformatie te verzamelen gebruik maken van laserstralen. De IBEO LD zendt laserstralen uit en vangt de weerkaatsing van deze stralen terug op. Aan de hand van de tijd die tussen de uitstraling en ontvangst zit, kan een schatting gemaakt worden van de afstand van het object waarop de laserstraal terugkaatste. Deze gegevens, samen met de verschillende hoeken waarin de laserstralen worden uitgestraald, kunnen doorgegeven worden aan een interne computer die hier een tweedimensionaal profiel van maakt.

De IBEO LD is in staat om op deze wijze een tweedimensionaal profiel op te stellen over een afstand tot 250 meter. De toepassingen van een laserscanner zijn talrijk. Zo kan een laserscanner het aantal gepasseerde voertuigen tellen met onderscheid tussen vrachtwagens, autobussen, auto's, fietsers en voetgangers. Hiervoor wordt de scanner in het verlengde van een rijstrook geplaatst (Figuur 12). De



Figuur 12: Een laser scanner in het verlengde van een rijstrook (Fürstenberg et al., 2000)

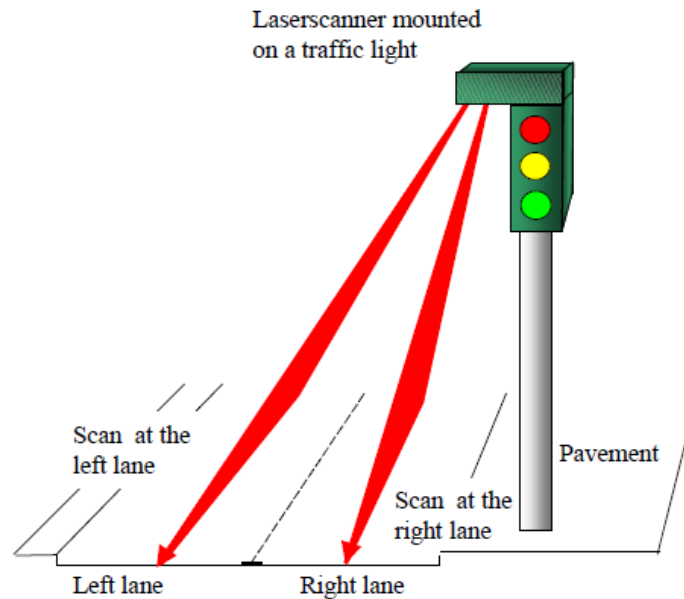


Figuur 13: Profielen van respectievelijk: vrachtwagenaanhangwagens, transporteur, kleine auto, sportauto en pick-up (Fürstenberg et al., 2000)

scanner is in staat om onderscheid te maken tussen de objecten aan de hand van hun profiel (Figuur 13). De scanner kan namelijk aan de hand van de hoogte, de lengte en de vorm van de profielen bepalen om welk soort object het gaat. Echter kan een laser scanner ook gebruikt worden om de toestand aan verkeerslichten te analyseren, en voor een vlottere doorstroming zorgen. Hiervoor wordt een laser scanner bovenop een verkeerslicht geplaatst. Deze laser scanner controleert alle rijstroken en analyseert de verkeerssituatie (Figuur 14). Een laser scanner kan eveneens ingezet worden op parkings. De scanner is in staat om de parkeerstroken te controleren op vrije plaatsen. (Fürstenberg, Hipp, & Liebram, 2000)

Hoewel de technologie van de laserscanner in het werk van Fürstenberg et al. (2000) vooral toegepast wordt om de verkeerstoestand te analyseren, kan zulke scanner en de informatie die het verschaft uiteraard ook gebruikt worden in de logistieke sector. Vooreerst kan een laserscanner informatie over de verkeerstoestand doorzenden naar een database. Deze database kan geraadpleegd worden door vrachtwagens en chauffeurs om een beter inzicht te krijgen in de verkeerstoestand en zo bijvoorbeeld eventuele drukke kruispunten of wegen vermijden.

Echter kunnen meerdere laserscanners ook gebruikt worden om een driedimensioneel beeld te vormen van objecten, zoals ladingen voor vrachtwagens die opgeslagen zijn in magazijnen. Deze informatie kan gedeeld worden met de vrachtwagens, zodat deze steeds in staat zijn om zelf te



Figuur 14: Laser scanner bovenop een verkeerslicht (Fürstenberg et al., 2000)

bepalen of ze al dan niet een bepaalde lading kunnen opladen. De afmetingen en vorm van de lading wordt vergeleken met de nog vrije ruimte in de vrachtwagen. Deze vrije ruimte in de vrachtwagen kan met behulp van een laser scanner bepaald worden, op eenzelfde manier als het bepalen van vrije parkeerplaatsen zoals Fürstenberg et al. (2000) aanhalen.

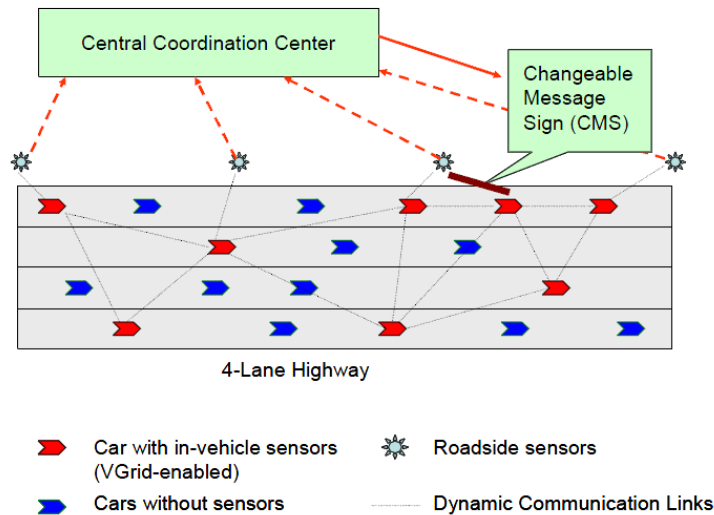
Net als bij de conventionele methoden dient opgemerkt te worden dat laserscanners enkel gebruikt kunnen worden om verkeersinformatie, of eventuele andere informatie te verzamelen. Bovendien is het niet mogelijk om tweezijdige communicatie te voeren. Om deze reden zijn laserscanners ongeschikt om informatie tussen verschillende voertuigen te delen. Enkel de informatie die verzameld wordt, kan gebruikt worden voor het voeren van een gedistribueerde aanpak voor de rittenplanning in logistieke netwerken.

2.4 Combinatie van infrastructuurvrije en infrastructuurgebaseerde methoden

Tot nu toe werden infrastructuurvrije en infrastructuurgebaseerde methoden afzonderlijk behandeld, maar uiteraard kunnen infrastructuurvrije en infrastructuurgebaseerde methoden eveneens gecombineerd worden om een beter geheel te bekomen. Een nadeel bij infrastructuurvrije methoden is dat deze methode geen algemeen beeld verschaft. Niemand kan bijvoorbeeld vanop afstand de informatie inkijken of raadplegen voor een bepaald land of landsdeel indien de informatie enkel ter hoogte van de voertuigen blijft. Infrastructuurgebaseerde methoden kunnen hier een rol in spelen door de informatie die de voertuigen aan elkaar doorgeven, eveneens te verzamelen. De infrastructuurgebaseerde methoden hebben dan weer als nadeel dat ze vaak kostelijk zijn. Dankzij de infrastructuurvrije methodes kan de nodige infrastructuur eventueel op verdere onderlinge afstand geplaatst worden. Met andere woorden wordt het bereik van de infrastructuur verruimd door middel van infrastructuurvrije communicatie.

Anda, Lebrun, Ghosal, Chuah en Zhang (2005) combineren infrastructuurvrije en infrastructuurgebaseerde methodes in hun *Vehicular-based Networking and Computing grid* (VGRID). VGRID bestaat uit vier functionele elementen. Een eerste element zijn de vaste sensoren ingebouwd in de weginfrastructuur. Koperlussen, camera's en laserscanners behoren tot deze categorie. Ze verzamelen gemiddelden omtrent de voertuigsoorten, voertuigenstroom of snelheid. Bovendien staan ze in contact met elkaar, alsook met een centraal coördinatiecentrum en de nabije voertuigen. Een tweede functioneel element van VGRID wordt gevormd door de sensoren in de voertuigen. Deze sensoren voorzien gegevens zoals de exacte reële snelheid en positie van het voertuig. Uiteraard kunnen deze sensoren ook gegevens doorgeven over het soort voertuig, de lading en de te volgen of reeds gevolgde route. Deze sensoren kunnen eveneens met elkaar, met vaste sensoren en met een centraal coördinatiecentrum communiceren. Een derde functioneel element wordt gevormd door een centraal coördinatiecentrum. Dit centrum verzamelt alle gegevens van de verschillende soorten sensoren en kan deze gegevens analyseren en omzetten naar bruikbare informatie, die eventueel op dynamische verkeersborden geprojecteerd kan worden. Deze dynamische verkeersborden vormen tevens het vierde functioneel element van VGRID. Deze verkeersborden kunnen aangepast worden naargelang de verkeerssituatie en kunnen berichten doorgeven aan bestuurders van voertuigen. Het gehele VGRID-concept wordt weergegeven in Figuur 15.

Bij het VGRID-principe kunnen de sensoren die ingebouwd zijn in de voertuigen met elkaar communiceren en vormen zo een VANET. Echter onderscheid VGRID zich op enkele vlakken van

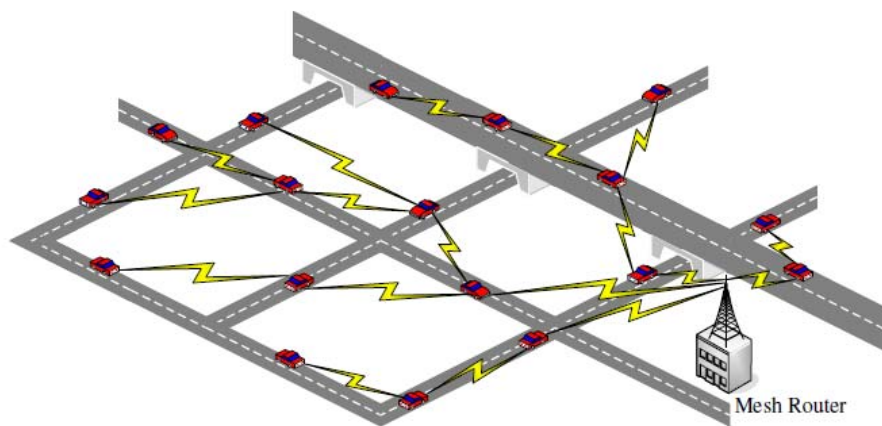


Figuur 15: De vier functionele elementen van VGRID (Anda, LeBrun, Ghosal, Chuah, & Zhang, 2005)

traditionele VANETs. Dankzij het mobiele karakter kan VGRID overal en op elk moment opgebouwd worden. Doordat VGRID eveneens ad-hoc werkt, kan informatie alle richtingen uitgestuurd worden. De gelimiteerde snelheid van de informatie-overdracht zorgt ervoor dat de informatie op een gespreide wijze verspreid wordt zodat het communicatienetwerk niet overbelast raakt. Doordat de sensoren een eigen reken capaciteit hebben, kan bij VGRID elk probleem zeer makkelijk en snel geanalyseerd en opgelost worden. (Anda, LeBrun, Ghosal, Chuah, & Zhang, 2005)

Een andere combinatie tussen infrastructuurvrije en infrastructuurgebaseerd methoden wordt beschreven door Zhang et al. (2007). Zij beschrijven een verkeersinformatiesysteem dat gebaseerd is op een *Wireless Mesh Network* (WMN). Een WMN bestaat uit mobiele *clients* en vaste routers. De mobiele *clients* communiceren met elkaar en met een centrale database gebruik makend van de vaste routers, die veelal een groter bereik hebben dan de *clients* zelf.

In het systeem van Zhang et al. (2007) vormen de voertuigen de *clients*, die eveneens de rol vervullen van *probes*. De voertuigen zijn uitgerust met een gegevensverzamelings eenheid (*Data Collection Unit*, DCU). Deze DCU bestaat uit een GPS-eenheid en sensoren die verschillende gegevens verzamelen zoals de staat van de weg, temperatuur, oppervlaktewater en lichtintensiteit. Dankzij de GPS-eenheid kunnen ook de snelheid en exacte locatie van het voertuig verzameld worden. Elk voertuig zendt periodiek de data die de DCU verzamelt draadloos naar een centraal verkeersinformatiecentrum. Dit gebeurt met behulp van de vaste routers, zendmasten. Echter daar het bereik van de voertuigen zelf relatief klein is, maken deze gebruik van een VANET om te communiceren met de dichtstbijzijnde vaste zendmast, zoals weergegeven in Figuur 16. De zendmasten staan eveneens onderling in contact met elkaar alsook met een centraal



Figuur 16: De communicatie tussen de voertuigen en de router (Zhang, et al., 2007)

verkeersinformatiecentrum. Op deze wijze kunnen dynamische gegevens beter en over een langere afstand verspreid worden met een minimale belasting van het communicatienetwerk.

Bovendien zorgt het gebruik van zendmasten ervoor dat dode zones gemakkelijk overbrugd kunnen worden. Het overbruggen van dode zones, een zone tussen twee niet rakende zendbereiken, vormt het onderwerp van het werk van Kitani et al. (2008). Zij overbruggden de dode zones in een *vehicle* ad-hoc netwerk door gebruik te maken van autobussen die een vaste route volgen. Bij een combinatie tussen infrastructuurvrije en infrastructuurgebaseerde methoden is het gebruik van autobussen om dode zones te overbruggen niet meer nodig, daar de zendmasten deze taak op zich kunnen nemen. Toch biedt de methode van Kitani et al. (2008) een efficiënte oplossing daar deze methode de informatie van het ene punt naar het andere punt overbrengt zonder het communicatienetwerk te belasten. Zendmasten, hoewel een grotere capaciteit dan mobiele zenders in een VANET, hebben immers eveneens een maximumcapaciteit. De methode van Kitani et al. (2008) neemt bijgevolg een klein deel van de belasting van de zendmasten weg.

De combinatie van infrastructuurvrije en infrastructuurgebaseerde communicatie biedt niet enkel een oplossing voor de overbelasting of snelheid van een VANET, het biedt namelijk ook de gelegenheid om laad- en losplaatsen of andere gebouwen van de logistieke keten te integreren in het communicatienetwerk. Op dezelfde wijze als voertuigen communiceren met elkaar en met vaste zendmasten, kunnen ook gebouwen communiceren met voertuigen, andere gebouwen of zendmasten. Dit biedt vele voordelen. Zo kunnen nieuwe bestellingen of wijzigingen in bestellingen via ad-hoc communicatie doorgegeven worden aan de voertuigen die deze dynamische gegevens kunnen incorporeren in hun besluitvorming omtrent de optimale routes en ladingen.

Hoofdstuk 3. Theoretische raamwerken

In dit hoofdstuk worden raamwerken aangehaald die de verzamelde dynamische gegevens gebruiken voor het bepalen van een, eventueel optimale, rittenplanning en ladingkeuze op een gedistribueerde wijze. Deze raamwerken gebruiken steeds de reeds aangehaalde methoden en technologieën als basis.

3.1 Vehicle Ad Hoc netwerken

In dit deel worden enkele raamwerken voor het gebruik van dynamische gegevens voorgesteld die gebruik maken van vehicle ad hoc netwerken (VANET).

3.1.1 Vehicle-to-Vehicle Real-time Routing

Ding, Wang, Meng en Wu (2010) maken gebruik van *vehicle-to-vehicle* communicatie om een real-time navigatie methode te ontwikkelen. In hun werk noemen ze deze methode *Vehicle-to-Vehicle Real-time Routing* (V2VRR). Bij V2VRR wordt verondersteld dat elk voertuig zijn eigen geografische positie kent en zichzelf kan positioneren op een digitale kaart. V2VRR bestaat uit twee stappen, namelijk de vraagfase en de antwoordfase. In de eerste fase stuurt het voertuig dat navigatiehulp nodig heeft een vraagpakket naar zijn bestemming. Dit vraagpakket zal het kortste pad nemen naar de bestemming. Alle voertuigen die zich op dit kortste pad bevinden, zullen met behulp van V2V communicatie het vraagpakket doorsturen tot zo dicht mogelijk bij de bestemming. Het voertuig dat zich het dichtst bij de bestemming bevindt, wordt de ontvanger van het vraagpakket. Een computereenheid in de ontvanger zal de reistijd van het kortste pad berekenen.

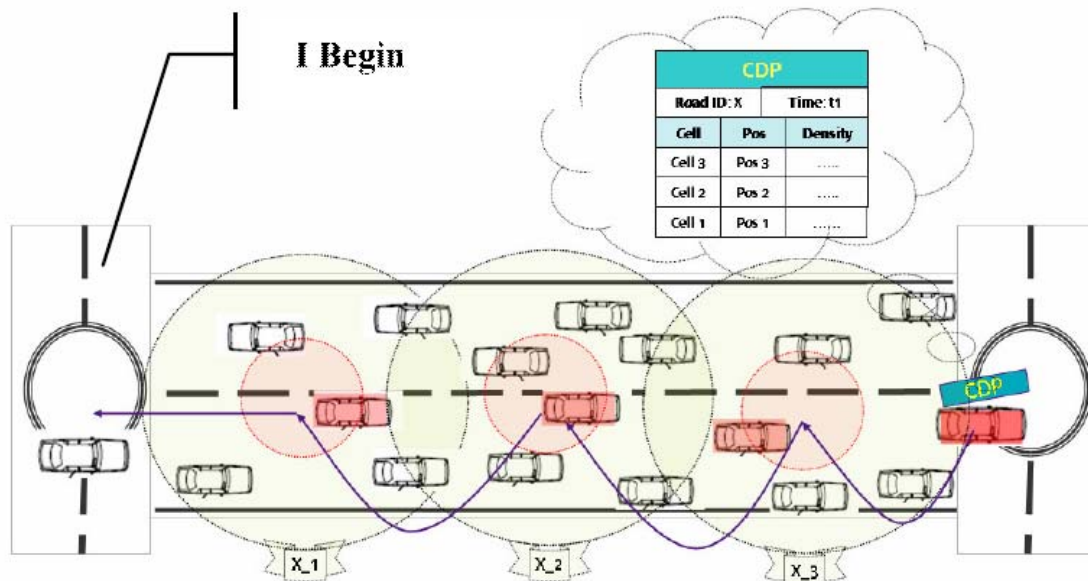
In de antwoordfase zal een datapakket met gegevens omtrent de reistijd terugvloeien van de ontvanger naar de bron, het initiële voertuig dat navigatiehulp vroeg. Dit antwoordpakket, in tegenstelling tot het vraagpakket, zal niet het kortste pad doorlopen, maar zal alle mogelijke paden tussen de bron en de bestemming volgen. Elk voertuig dat zich op één van deze paden bevindt, voegt informatie zoals de huidige snelheid toe aan het antwoordpakket en stuurt het verder. Op deze wijze kan het antwoordpakket gegevens als de gemiddelde snelheid van alle voertuigen op dat welbepaald pad berekenen. Eenmaal de antwoordpakketten terug aankomen in de bron, kan dit voertuig

gemakkelijk de snelste route kiezen, afgaand op de reistijden gebaseerd op de gemiddelde snelheid van alle mogelijk routes tussen bron en bestemming.

De auteurs, Ding et al. (2010) maken echter zelf al de opmerking dat het antwoordpakket een ongecontroleerde verspreiding over alle mogelijke paden ondergaat. Op deze manier zal een wirwar van antwoordpakketen rondgestuurd worden, wat het V2V communicatienetwerk zwaar zal belasten. Om zulke overbelasting te voorkomen, hebben de auteurs *Long Route Drop*, *Loop-Duplication Drop* en *Convergence-Duplication Drop* werkwijzen bedacht. Bij de *Long Route Drop* werkwijze, vergelijkt elk voertuig dat een antwoordpakket ontvangt zijn gemiddelde reistijd tot de bestemming. Indien deze tijd de reistijd over het kortste pad tussen de initiële bron en de bestemming overschrijdt, zal het antwoordpakket niet meer verder verzonden worden. Het heeft immers geen nut om een pad te zoeken waarvan de reistijd langer bedraagt dan die van het kortste pad. De *Loop-Duplication Drop* werkwijze wordt toegepast indien zich een vizioze cirkel voordoet. Indien een voertuig een pakket ontvangt dat al eens voorbij gekomen is, zal het dit pakket niet doorsturen, vermits het pakket dan gewoon een cirkelbeweging gemaakt heeft en zulke beweging altijd trager is dan een beweging in een rechte lijn. Bij de *Convergence-Duplication Drop* werkwijze zal een voertuig een pakket niet meer doorsturen, als het reeds eerder een pakket met kortere reistijd doorgestuurd heeft. Het kan immers voorvallen dat een voertuig meerdere pakketten van dezelfde navigatieaanvraag ontvangt maar hierbij is niet nodig om pakketten door te sturen die reeds een langere reistijd bevatten dan een eerder doorgestuurd pakket.

Een andere manier waarop de netwerkbelasting volgens Ding et al. (2010) verminderd kan worden, is door het gebruik van de celgebaseerde techniek van Jerbi, Senouci, Rasheed, & Ghamri-Doudane (2007). Zij zochten naar een niet-infrastructuur gebaseerde manier om de drukte op een weg te meten zonder het communicatienetwerk te overbelasten. Ze kwamen tot een oplossing door gebruik te maken van V2V communicatie en door voertuigen te groeperen in cellen. Jerbi et al. (2007) motiveren hun keuze om voertuigen te groeperen met het feit dat voertuigen die zich dicht bij elkaar bevinden, in dit geval binnen één cel, ook dezelfde verkeerscondities ondergaan.

Hierbij wordt elke weg in vaste cellen verdeeld en elk voertuig dat zich het dichtst bij het centrum van een cel bevindt, wordt voor een bepaalde tijd celleider (Figuur 17). Elke celleider ontvangt data van de andere voertuigen binnen dezelfde cel en kan zo gemiddeldes en standaardafwijkingen berekenen aangaande snelheid, reistijd en dergelijke. Elke celleider updatet vervolgens het informatiepakket van de huidige weg. Dit informatiepakket bevat gegevens over de weg alsook over alle cellen op die weg. De celleider updatet met andere woorden de gegevens van zijn cel in het



Figuur 17: Celgebaseerde V2V techniek (Jerbi, Senouci, Rasheed, & Ghamri-Doudane, 2007)

informatiepakket. Hierna stuurt de celleider het pakket door naar de volgende celleider, die op zijn beurt het pakket updatet. Indien het informatiepakket een kruispunt nadert, wordt het terug de straat in gezonden en bovendien ook doorgezonden naar alle voertuigen in de buurt van het kruispunt, zodat deze een goed beeld krijgen over de verkeersdrukke en verkeerstoestand van de straat.

Ding et al. (2010) gebruiken deze celtechniek echter niet om de verkeersdrukke te meten, maar om de wildgroei aan antwoordpakketten bij V2VRR te limiteren. In hun toepassing van de celtechniek zal enkel de celleider een antwoordpakket ontvangen. Vermits de celleider de gegevens van alle voertuigen binnen de cel kent, kan deze het antwoordpakket gemakkelijk updaten met de nodige gemiddelden. Nadat alle informatie toegevoegd is aan het antwoordpakket, wordt deze opnieuw doorgestuurd naar andere celleiders. Ding et al. (2010) duiden er echter wel op dat de celgrootte goed gekozen moet worden. Als de celgrootte te groot is, zullen de spreekpunten van elke cel niet met elkaar kunnen communiceren en zal bovendien de doorgestuurde verkeersinformatie minder nauwkeurig zijn.

Na simulaties komen Ding et al. (2010) tot de conclusie dat V2VRR weldegelijk tot een verbetering van de reistijd leidt. Zo worden routes gevonden die de reistijd tot 70% doen dalen in vergelijking met de kortste route. Bovendien worden steeds meerdere routes met een kortere reistijd dan de kortste route gevonden. Dit voorziet de bestuurder in keuzemogelijkheden, waarbij de bestuurder de mogelijkheid heeft om voorkeur te hechten aan bepaalde verkeerstoestanden en/of wegen.

3.1.2 Self-Organizing Traffic Information System

Wischhof, Ebner, Rohling, Lott, & Halfmann (2003) ontwierpen een zelforganiserend verkeersinformatiesysteem (*Self-Organizing Traffic Information System*, SOTIS) gebaseerd op *vehicle-to-vehicle* (V2V) communicatie. In SOTIS verzamelt elk voertuig gegevens over zichzelf, zoals de positie en de snelheid. Deze informatie wordt via een digitale radioverbinding gedeeld met alle andere voertuigen in de omgeving. Elk voertuig analyseert zelf, aan de hand van alle ontvangen informatie, de verkeerstoestand. Op deze manier kent elk voertuig op elk moment de verkeerstoestand binnen een straal van 50 tot 100 kilometer. (Wischhof, Ebner, Rohling, Lott, & Halfmann, 2003)

Bij het ontwerpen van SOTIS, werden een aantal assumpties aangenomen. Zo werd er vanuit gegaan dat elke bestuurder enkel door informatie uit de nabije omgeving beïnvloed kan worden. Hierdoor is het slechts nodig om verkeersinformatie binnen een straal van 50 tot 100 kilometer te verzamelen. Verder werd er ook van uitgegaan dat SOTIS reeds kan werken indien slechts twee procent van de voertuigen op het wegennetwerk uitgerust zijn met de nodige SOTIS technologie. Dit zodat SOTIS in een vroege fase van commercialisering toch werkzaam kan zijn. Een bestuurder heeft bovendien degraderende verwachtingen over de precisie van de informatie. Zo heeft een bestuurder geen nood aan het weten van de exacte locatie van een file die zich 30 kilometer verderop bevindt, in dat geval is een afwijking van 500 meter geen probleem. Echter is de exacte locatie wel nodig indien de file zich dichtbij bevindt. Hoe dicht het probleem zich bevindt, hoe nauwkeuriger de informatie moet zijn. (Wischhof et al., 2003)

SOTIS maakt gebruik van een GPS-ontvanger en een digitale radiozender en -ontvanger. Bovendien dient elk voertuig een kenniscentrum te bezitten waarin alle informatie kan worden opgeslagen. In SOTIS stuurt elk voertuig periodiek een informatiepakket naar de voertuigen in de omgeving. Zo een informatiepakket omvat de snelheid, richting, positie en een korte analyse van de verkeerstoestand, gebaseerd op de informatie die zich reeds in het kenniscentrum van het voertuig bevindt. Naast deze informatiepakketten kan een voertuig ook een noodgevalpakket rondsturen, indien zich een noodgeval voordoet, zoals een bruusk remmanoeuvre of een groot risico op een botsing. Indien een voertuig een informatiepakket of noodgevalpakket ontvangt, zal deze informatie opgeslagen worden in het kenniscentrum, waarna nieuwe analyses uitgevoerd kunnen worden om een actueel beeld van de verkeerstoestand te verkrijgen. (Wischhof et al., 2003)

3.1.3 TrafficView

TrafficView van Nadeem, Dashtinezhad, Liao en Iftode (2004) is een raamwerk om verkeersinformatie te verzamelen en te verspreiden gebruik makend van V2V communicatie. Wanneer *TrafficView* geïntegreerd wordt met een digitale kaart, is het in staat om in een automatische real-time rittenplanning te voorzien. (Nadeem, Dashtinezhad, Liao, & Iftode, 2004)

Nadeem et al. (2004) spreken over twee methoden om informatie te verspreiden. De eerste methode is *flooding*. Hierbij zendt elk voertuig een informatiepakket over zijn eigen toestand rond. Andere voertuigen pikken dit informatiepakket op en sturen dit informatiepakket samen met hun eigen informatiepakket onmiddellijk door naar andere voertuigen. Op deze manier ontstaat een zondvloed aan informatiepakketten. De tweede methode die Nadeem et al. (2004) aanhalen is diffusie. Hierbij stuurt elk voertuig dat een informatiepakket ontvangt, deze niet onmiddellijk door, maar analyseert de informatie eerst en voegt deze informatie samen met de informatie die het voertuig reeds bezit. Op deze manier bezit elk voertuig op elk moment informatie over zowel zichzelf als over alle andere voertuigen rondom zich. Wanneer de nieuwe informatie verwerkt is en samengevoegd is met de reeds gekende informatie, wordt één pakket met alle informatie doorgezonden naar andere voertuigen. Op deze wijze wordt het aantal informatiepakketten drastisch verminderd. (Nadeem, Dashtinezhad, Liao, & Iftode, 2004)

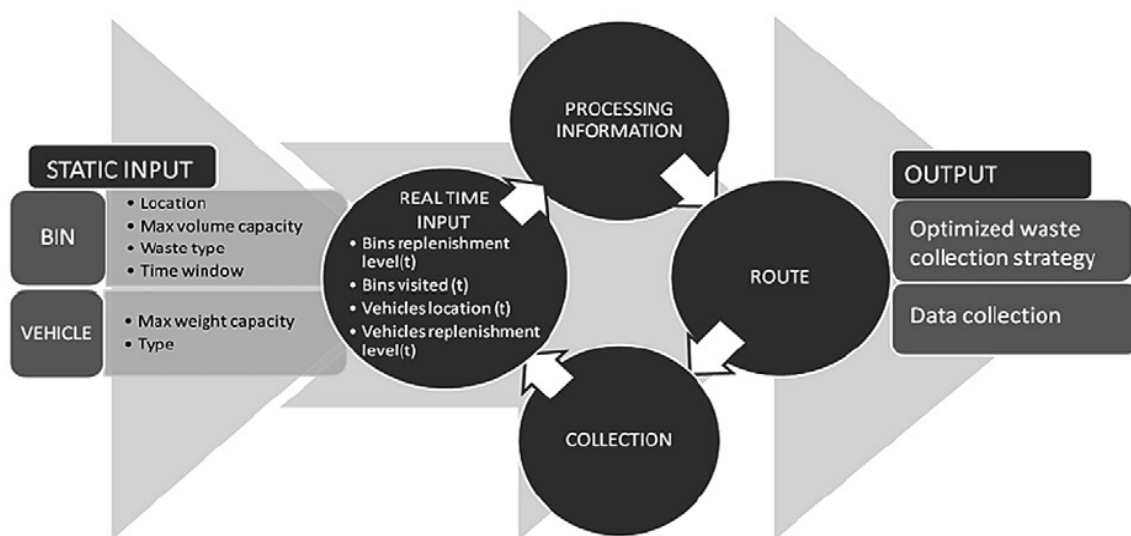
Om informatie te verspreiden met *TrafficView*, maken Nadeem et al. (2004) gebruik van de diffusie methode. Deze methode is immers schaalbaar, in vergelijking met de *flooding* methode die niet schaalbaar is. Hoewel elk voertuig slechts 1 megabyte opslagcapaciteit nodig heeft om de gegevens van alle voertuigen binnen 20 kilometer op te slaan, vormt zich een probleem voor het draadloos overbrengen van dit informatiepakket. Indien elk voertuig een zendbereik heeft van 250 meter, en zich binnen die 250 meter 200 andere voertuigen bevinden, gebruiken alle 200 voertuigen dezelfde bandbreedte. Elk van die 200 voertuigen zal zijn informatiepakket van 1 megabyte willen versturen, wat neerkomt op een totale informatieoverdracht van 250 megabyte. De benodigde bandbreedte van 250 megabyte vormt hier een probleem, vermits geen enkele draadloze technologie in zulke grote bandbreedte voorziet. Het is bijgevolg nodig om de verzonden informatie te comprimeren en samen te voegen. Zo kan informatie over voertuigen die zich zeer dicht bij elkaar bevinden gecomprimeerd worden tot één gegeven. Op deze manier verlaagt het volume dat een informatiepakket inneemt en vormt de gelimiteerde bandbreedte geen probleem meer. (Nadeem, Dashtinezhad, Liao, & Iftode, 2004)

3.2 Radio Frequency Identification

Ustundag en Cevikkan (2008) tonen het gebruik van RFID-technologie voor het coördineren en beheren van afvalophaling. Ze halen enkele gevalstudies aan waar de afvalophaling verloopt met behulp van de RFID-technologie. Zo is er bijvoorbeeld de gevalstudie van Court County Council, waar de afvalcontainers uitgerust met RFID-labels gegevens van de eigenaar doorgeven aan de vrachtwagen. Deze vrachtwagen weegt de container en bepaalt de inhoud ervan, waarna alle informatie in een database vermeld wordt. Op deze manier kunnen de inwoners de afvalophaling betalen naargelang het gewicht. Verschillende andere gevalstudies tonen het gebruik van RFID voor het volgen of detecteren van bepaalde afvalsoorten, zoals medisch afval of vertrouwelijke documenten voor verbranding.

De auteurs, Ustundag en Cevikkan (2008), stellen eveneens een optimalisatiemodel voor om de optimale route te berekenen van een vrachtwagen voor afvalophaling, rekening houdende met de resterende capaciteit van de vrachtwagen en het afvalvolume van de afvalbakken. Op deze wijze kan een vrachtwagen beslissingen nemen aangaande zijn route rekening houdend met de dynamische gegevens die het ontvangt van de afvalbakken omtrent hun volume.

Ook Faccio, Persona en Zanin (2011) integreren een RFID-systeem in gemeentelijke afvalophaling. Ze baseren zich hierbij op de wijze van afvalophaling in grote delen van Italië, waar middelgrote afvalcontainers een vaste positie hebben. Alle bewoners kunnen hun afval deponeren in deze voorziene containers. Het raamwerk opgesteld door Faccio et al. (2011) is weergegeven in Figuur 18.



Figuur 18: Raamwerk voor afvalophaling gebruik makend van RFID (Faccio, Persona, & Zanin, 2011)

Dit raamwerk maakt gebruik van statische inputgegevens en dynamische, real-time inputgegevens. De statische inputgegevens omvatten allerhande informatie die op voorhand reeds gekend is, zoals de locatie van de afvalcontainers, de maximale capaciteit van de afvalcontainers en de vrachtwagens, het soort afval, enzovoort. De dynamische inputgegevens bestaan uit informatie over het afvalniveau in de afvalcontainer en de vrachtwagen, de exacte real-time locatie van de vrachtwagen en de reeds bezochte afvalcontainers. Al deze gegevens worden samen verwerkt in een centraal informatiecentrum en aan de hand van een heuristiek wordt de optimale route voor elk voertuig berekend. Telkens een vrachtwagen een afvalcontainer ledigt, worden alle gegevens vernieuwd en wordt voor elke vrachtwagen een nieuwe optimale route berekend.

De dynamische gegevens nodig in het raamwerk van Faccio et al. (2011) worden op verschillende wijzen verzameld. De afvalcontainers meten met behulp van een volumesensor het afvalniveau in de container. Dit niveau wordt steeds doorgegeven aan het informatiecentrum met behulp van *General Packet Radio Service* (GPRS). De vrachtwagens geven eveneens hun volume, gewicht en positie via GPRS door aan het informatiecentrum. Telkens een afvalcontainer wordt geleegd door een vrachtwagen, geeft deze informatie omtrent zijn identificatienummer en afvaltype door aan de vrachtwagen met behulp van RFID. Elke afvalcontainer is uitgerust met een RFID-transponder en elke vrachtwagen is uitgerust met een RFID-lezer.

RFID kan eveneens gebruikt worden voor het verbeteren van het transport van bederfelijke etenswaren. Wang, Kwok en Ip (2010) ontwierpen een real-time controle en *online decision support system* dat gebruik maakt van RFID. Met behulp van het RFID-controlesysteem kan op elk moment de staat van de bederfelijke goederen nagegaan worden. Indien goederen in verre staat van bederving zijn, kan de klant aan de hand van de real-time gegevens beslissen om de goederen niet meer te accepteren. Deze beslissing wordt doorgegeven aan de bestuurder, die zijn bestemming wijzigt naar een stortplaats. Ook kan met dit systeem bekeken worden welke klanten eerst bediend dienen te worden, naargelang de bederving van de goederen.

Het systeem van Wang et al. (2010) werkt als volgt. De gebruiker voert een transportplan in het systeem in. Aan de hand van dit originele transportplan en de huidige locatie worden de aankomsttijden berekend door een voorspellingsmodule, die de reistijden berekent aan de hand van dynamische verkeerscondities. Tegelijkertijd zal een controlemodule de toestand van de producten meten en controleren. Aan de hand van een model wordt de kwaliteit van de producten berekend. Al de informatie die de controlemodule en voorspellingsmodule verschaffen, wordt rechtstreeks doorgezonden naar een waarschuwingsmodule. Deze waarschuwingsmodule bekijkt aan de hand van

de verkregen informatie of waarschuwingen gegeven moeten worden aan de gebruiker. Alle gegevens, samen met de waarschuwingen, worden vervolgens doorgegeven aan een beslissingsmodule. Deze module zal enkele suggesties aan de gebruiker doorgeven via het gebruikersscherm. De gebruiker kan deze suggesties al dan niet accepteren waarna het transportplan indien nodig gewijzigd zal worden. Het systeem zal eveneens input van de gebruiker aanvaarden. Indien deze input verschilt van de door de beslissingsmodule voorgestelde suggestie, zal de uitkomst van deze input vergeleken worden met die van de voorgestelde suggestie. Indien de input van de gebruiker een beter resultaat geeft dan de voorgestelde suggestie, zal het systeem hieruit leren en deze gebruikersinput gebruiken bij toekomstige problemen. Een simulatie van dit systeem wees uit dat het systeem het verlies door bederf van producten met de helft kan verminderen. (Wang et al., 2010)

Hoofdstuk 4. Toegepaste technologieën

Vele van de eerder besproken technologieën zijn nog niet volledig implementeerbaar en/of commercialiseerbaar. Toch bevinden enkele, meestal infrastructuurgebaseerde, technologieën zich reeds in de testfase of worden ze al commercieel toegepast. In dit hoofdstuk worden achtereenvolgens de commerciële toepassingen en de testprojecten verder uiteengezet. Hierbij wordt enkel rekening gehouden met de projecten en toepassingen die werken met vernieuwende communicatietechnologieën en niet met conventionele technologieën.

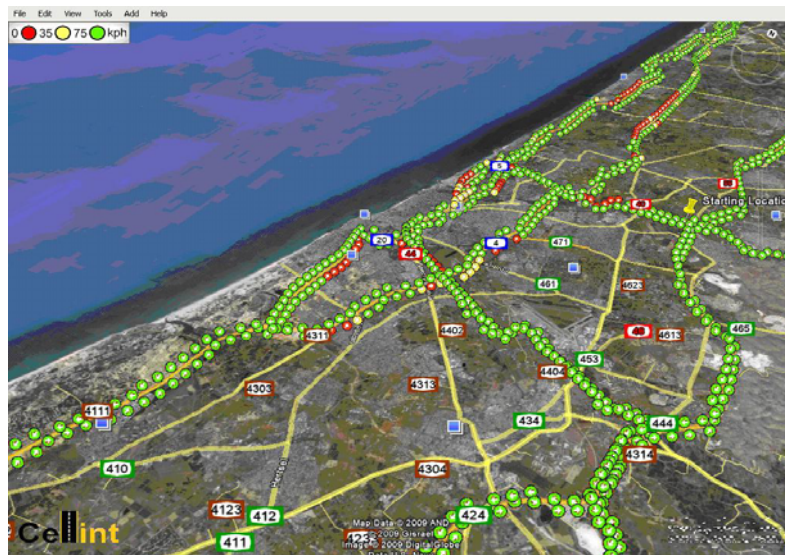
4.1 Commerciële toepassingen

Van de eerder besproken communicatietechnologieën voor het verzamelen, versturen en ontvangen van dynamische gegevens kenne slechts enkele al een commerciële toepassing. Het gaat met name over toepassingen gebaseerd op de mobiele telefonie en *Radio Frequency Identification*. Verder worden enkele van de aanbieders van zulke toepassingen besproken en wordt bekeken welke oplossingen deze aanbieders bieden voor het optimaliseren van ladingkeuze en/of rittenplanning in logistieke netwerken rekening houdend met dynamische gegevens.

4.1.1 Cellint

Cellint, opgestart in 2005 in Israël, is een bedrijf dat verkeersinformatie verzamelt door middel van het mobiele telefoonnetwerk. De Cellint systemen zijn reeds geïmplementeerd in delen van de Verenigde Staten van Amerika, Europa en het Midden-Oosten. (Cellint, 2010)

Het systeem van Cellint om verkeersinformatie te onttrekken uit signalen van mobiele telefoons noemt *TrafficSense*. Het systeem voorziet verkeersinformatie in bepaalde steden en landen over alle snelwegen, grote verkeersaders en belangrijke wegen. *TrafficSense* werkt echter niet volgens de traditionele methodes als trilateratie of *Timing Advance* (zie 2.3.4). Het systeem van Cellint werkt namelijk met een locatiereferentiedatabase. Deze database bevat alle signaalpunten gelinkt aan de coördinaten van het wegennetwerk. Om de database aan te leggen, stuurt Cellint voertuigen op pad om het gehele wegennetwerk waarover verkeersinformatie dient verzameld te worden, af te rijden. Het voertuig stuurt periodiek signalen door via het mobiele telefoonnetwerk. Deze signalen worden



Figuur 19: Visuele weergave van de verkeersinformatie via *TrafficSense* (Cellint, 2012)

gelinkt aan exacte coördinaten afkomstig van een *global positioning system*. Zo ontstaat een database van het wegennetwerk waarbij elk stuk weg gelinkt wordt aan een bepaald signaal. Eenmaal de database volledig is, kan elk signaal van mobiele telefoons vergeleken worden met de gegevens in de database en op het wegennetwerk gepositioneerd worden. Eenmaal de positie van de mobiele telefoon en het voertuig gekend is, kan de gemiddelde snelheid en de reistijd van het voertuig berekend worden. Indien alle gegevens van alle voertuigen gekend zijn, geeft dit een goede en accurate weergave van de gemiddelde snelheid en doorreistijd van wegsegmenten. Op deze manier wordt een zeer nauwkeurige weergave verkregen van het wegennetwerk (Figuur 19). (Cellint, 2012)

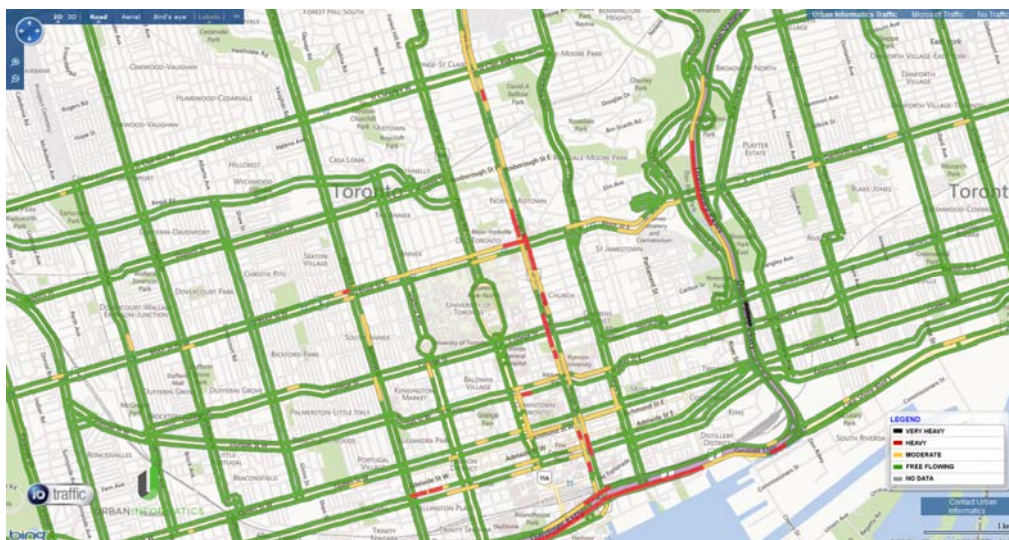
4.1.2 Airsage

Sinds de opgerichting in 2000, is Airsage uitgegroeid tot de marktleider in de Verenigde Staten van Amerika op vlak van het leveren van mobiliteitsgegevens onttrokken uit signalen van mobiele telefoonnetwerken. Airsage gebruikt hiervoor de door henzelf gepatenteerde *Wireless Signal Extraction* technologie. Met behulp van deze technologie is Airsage in staat om de beweging van elke mobiele telefoon te analyseren door middel van de signalen die de telefoons uitzenden in het mobiele telefoonnetwerk. Alle verzamelde gegevens worden geanalyseerd en omgevormd tot bruikbare informatie omtrent de verkeersstoestand op het wegennetwerk. (AirSage, 2013a, 2013b)

4.1.3 Intelligent Mechatronic Systems

Het Amerikaans bedrijf Intelligent Mechatronic Systems werd opgestart in 1999 met het oorspronkelijke doel om voertuigen te voorzien van allerlei veiligheidssystemen zoals gordelsensoren en snelheidswaarschuwingen om het verkeer voor bestuurders veiliger te maken. Doorheen de jaren breidde het bedrijf zich uit in de breedte en nam het in 2011 het bedrijf IntelliOne over, een bedrijf gespecialiseerd in verkeersmonitoring. (Intelligent Mechatronic Systems, 2012)

Sinds de overname kan Intelligent Mechatronic Systems voorzien in real-time verkeersinformatie die gebruikt kan worden voor verkeersmanagementsystemen of rittenplanning. Hiervoor maakt het gebruik van de gepatenteerde *Metro Traffic Engine* technologie ontwikkeld door Urban Informatics, een zusterbedrijf. De *Metro Traffic Engine* technologie is in staat om de locatie van mobiele telefoons te achterhalen door gebruik te maken van *Network Measurement Reports* die reeds aanwezig zijn in mobiele telefoonnetwerken. Deze rapporten worden door een positioneringssysteem omgezet in bruikbare gegevens over de verkeersstoestand. Het systeem voorziet op deze wijze in real-time gegevens over snelwegen, primaire wegen en belangrijke verkeersaders in steden als Florida en Toronto. Het systeem voorziet eveneens een grafische weergave van de real-time verkeersstoestand, zoals in Figuur 20 voor de stad Toronto. (Intelligent Mechatronic Systems, 2013; Urban Informatics, 2013)



Figuur 20: Weergave van de verkeersstoestand via *Metro Traffic Engine* (Intelligent Mechatronic Systems, 2013)

4.1.4 INRIX

INRIX is een Amerikaans bedrijf dat zich gespecialiseerd heeft in verkeersinformatie. Door middel van het *Smart Driver Network* verkrijgt INRIX gegevens van miljoenen voertuigen uitgerust met een *Global Positioning System*, mobiele telefoons en conventionele meetinstrumenten. Het voorziet zo in actuele verkeersinformatie voor snelwegen, primaire wegen, en belangrijke secundaire wegen. Het *Smart Driver Network* voorziet al verkeersinformatie over miljoenen kilometers in zowel Noord-Amerika als Europa. (INRIX, 2013a, 2013b)

INRIX voorziet echter niet enkel in actuele verkeersinformatie, maar ook in toekomstige verkeersinformatie door middel van haar *3rd Generation Routing Engine*. Hiervoor neemt het verschillende factoren in rekening, zoals de huidige verkeerstoestand, de dag van de week, de maand, de voorspelde weercondities, speciale gelegenheden, feestdagen, enz. Op deze wijze kan INRIX elke bestuurder voorzien van rittenplanningen die eveneens rekening houden met toekomstige verkeerstoestanden waardoor een betere rittenplanning mogelijk is. (INRIX, 2013b, 2013c)

4.1.5 Mediamobile

Mediamobile, opgericht in 1996 te Frankrijk, is een bedrijf dat real-time verkeersinformatie voorziet in Frankrijk, Polen en Zweden, gebruik makend van gegevens die het verkrijgt van mobiele telefoonnetwerken en *Global Positioning Systems*. Het huidige systeem *V-Traffic* analyseert de real-time gegevens van honderdduizenden voertuigen die zich op het wegennetwerk in Frankrijk, Polen en Zweden bevinden. *V-Traffic* voorspelt bovendien toekomstige verkeerstoestanden om een optimale rittenplanning mogelijk te maken die rekening houdt met patronen in de verkeerstoestand. (Mediamobile, 2013a, 2013b)

4.1.6 Sirit Inc.

Sirit Inc. is een onderneming gespecialiseerd in *Radio Frequency Identification* (RFID) technologie. Hun *Identity Flex Traffic Probe* technologie voorziet in een accurate voorspelling van verkeersstromen. De *Identity Flex* RFID-lezer is ontworpen om wegsegmenten te monitoren en gegevens van voertuigen die uitgerust zijn met een RFID label te lezen. Deze label bevat informatie zoals het identificatienummer en de gemiddelde snelheid van het voertuig. Bovendien kan het

Identity Flex systeem de gemiddelde reistijd van voertuigen berekenen tussen twee RFID-lezers. Op deze wijze kan het systeem grote hoeveelheden data verzamelen en analyseren om dynamische verkeersinformatie te voorzien. De RFID-lezers kunnen labels lezen die zich met een snelheid tot 130 kilometer per uur voortbewegen. Hierbij wordt niet ingeboet aan nauwkeurigheid. Eén RFID-lezer is bovendien in staat om vier verschillende labels simultaan te lezen. De RFID-lezers kennen eveneens een maximaal leesbereik van acht meter. Deze eigenschappen maken het *Identity Flex* systeem een zeer geschikt systeem om dynamische gegevens te verzamelen. (Sirit Inc., 2005, 2013)

4.1.7 TomTom

TomTom, leverancier van navigatie en locatiegebaseerde producten en diensten, lanceerde in 2007 een systeem voor real-time en dynamische navigatie onder de merknaam *HD Traffic*. *HD Traffic* werd eerst gelanceerd in Nederland, maar kende al snel uitbreiding over grote delen van Europa, Noord-Amerika en Australië. (Leduc, 2008; TomTom, 2013)

HD Traffic voorziet in zeer actuele en betrouwbare reistijden zodat voorzien kan worden in optimale routes. *HD Traffic* maakt hiervoor gebruik van gegevens die voorzien worden door mobiele telefoons, alle aangesloten TomTom GPS-toestellen en conventionele meetinstrumenten zoals koperlussen en camera's. Om de verkeersinformatie te verzamelen maakt *HD Traffic* gebruik van de door TomTom gepatenteerde *Core Traffic Data Collection* technologie. Deze technologie combineert de gegevens van de TomTom GPS-toestellen, conventionele meetinstrumenten en de mobiele telefoons. Deze laatste gegevens worden gebruik makend van een *Cellular Floating Phone Data* systeem (CFPD) verzameld (Atkinson, Adam, & Dixon, 2004). CFPD gebruikt anonieme GSM-signalen van miljoenen mobiele telefoons om door middel van *Timing Advance* (zie 2.3.4) de gebruikers van deze mobiele telefoons op een digitale wegenkaart weer te geven. Uiteraard worden op deze wijze eveneens onnodige of dubbele gegevens verzameld, bijvoorbeeld gegevens van meerdere personen binnen één voertuig of van voetgangers. Deze overbodige gegevens worden in het CFPD uit de database gefilterd door gebruik te maken van patronen in gemiddelde snelheden en verandering in snelheid. Indien meerdere gebruikers bijvoorbeeld éénzelfde patroon kennen van snelheid en verandering in snelheid, is de kans reëel dat deze gebruikers zich binnen hetzelfde voertuig bevinden en worden deze gegevens samengevoegd tot één gebruiker. (TomTom, z.d.)

Alle gegevens worden geanalyseerd om zeer actuele en real-time verkeersinformatie te bekomen. Indien *HD Traffic* echter gecombineerd wordt met *IQ Routes*, eveneens van TomTom, kan in nog

betere rittenplanning voorzien worden. *IQ Routes* analyseert namelijk historische verkeersinformatie om patronen te zoeken en te reflecteren naar de toekomst. Op deze manier kan TomTom zowel actuele, real-time verkeersinformatie als nauwkeurig voorspelde toekomstige verkeersinformatie gebruiken om optimale routes te berekenen. (TomTom, z.d.)

Om de verkeersinformatie naar de GPS-toestellen te sturen wordt gebruik gemaakt van tweerichting GPRS communicatie. Om alle gegevens zo actueel mogelijk te houden worden alle GPS-toestellen elke drie minuten voorzien van nieuwe verkeersinformatie. Op deze manier kan het GPS-toestel snel en efficiënt reageren op nieuwe incidenten of congestievorming en indien nodig de routes herberekenen. TomTom beweert dat het gebruik van *HD Traffic* de totale reistijd tot wel 15% kan doen dalen. Bovendien beweert TomTom dat indien 10% van de bestuurders gebruik maakt van *HD Traffic* een zelf-organiserend en onderling communicerend netwerk ontstaat waardoor de reistijd van alle bestuurders, gebruiker van *HD Traffic* of niet, met 5% zal dalen, het zogenaamde collectief effect. (TomTom, 2011, z.d.)

4.1.8 Conclusie

Tal van bedrijven gebruiken de vernieuwende technologieën als mobiele telefonie en *Radio Frequency Identification* reeds om dynamische gegevens te verzamelen en te analyseren. Doch bieden deze bedrijven geen toepassingen om dynamische gegevens te verspreiden, via *vehicle-to-vehicle* communicatie noch via *vehicle-to-infrastructure* communicatie. Dit toont nogmaals dat het verspreiden van dynamische gegevens geen eenvoudige taak is en de technologie hiervoor nog niet verfijnd genoeg is om commercieel toe te passen. Door het ontbreken van gecommercialiseerde vernieuwende methodes om dynamische gegevens te verspreiden is het eveneens moeilijk om voertuigen autonome beslissingen te laten maken aangaande hun route en/of lading, daar de voertuigen niet tijdig over de nodige actuele gegevens beschikken. Een gedistribueerde aanpak van rittenplanning is dan ook zeer moeilijk.

Toch lijkt de mogelijkheid tot het voeren van een gedistribueerde aanpak niet veraf. TomTom stelt namelijk, hoewel niet duidend op het verspreiden van algemene dynamische gegevens, dat in de nabije toekomst hun navigatiesystemen, uitgerust met *HD-traffic*, met elkaar zullen kunnen communiceren (TomTom, 2011, z.d.). Dit schept uiteraard mogelijkheden om een alleenstaand netwerk te vormen van communicerende voertuigen en zo een gedistribueerde aanpak van rittenplanning te voeren.

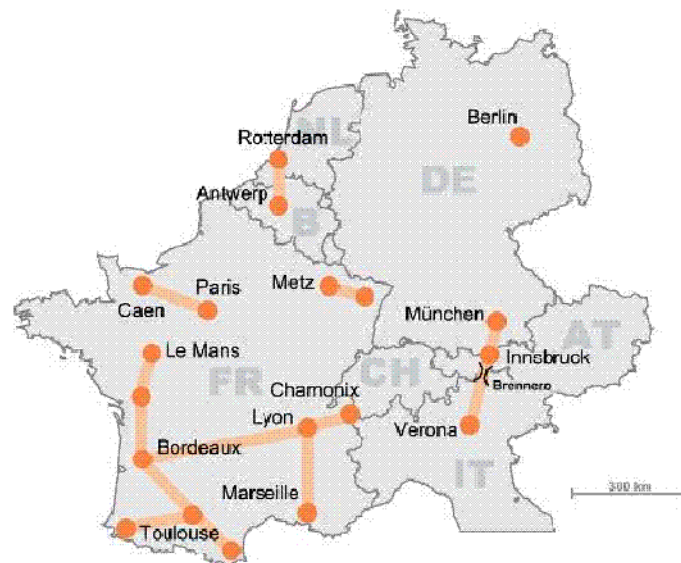
4.2 Proefprojecten

De vele theorieën over vernieuwende communicatietechnologieën en hun mogelijkheden zijn de laatste jaren onderzocht door tal van proefprojecten. Hierbij dient opgemerkt te worden dat vele proefprojecten op eenzelfde technologie steunen maar verschillende toepassingen of mogelijkheden van de technologie onderzoeken. Enkele van deze proefprojecten worden verder kort besproken.

4.2.1 Co-operative System for Intelligent Road Safety (COOPERS)

Co-operative System for Intelligent Road Safety (COOPERS) is een Europees project dat gelanceerd werd in februari 2006 en een totaal budget van € 16.800.000 ter beschikking had. Na een duur van 54 maanden werd het testproject in juni 2010 beëindigd. De visie achter het testproject was het verhogen van de veiligheid op de weg door voertuigen draadloos te laten communiceren met de weginfrastructuur om gegevens en informatie over wegsegmenten te delen (Pfliegl, 2010). COOPERS werd getest op enkele veelgebruikte snelwegen in Europa. Deze testtrajecten lagen verspreid over zeven landen: België, Duitsland, Frankrijk, Italië, Nederland, Oostenrijk en Zwitserland (Figuur 21). Elk testtraject bevatte een verschillende infrastructuur en communicatiemethode. (COOPERS, 2010)

COOPERS bestaat uit zes functionele elementen, zoals afgebeeld in Figuur 22 op pagina 73. Het *Traffic Control Center (TCC, (1)* in Figuur 22) is een centraal centrum dat de verkeersstromen beheert en controleert. Het TCC voorziet eveneens verkeersinformatie aan bestuurders en stuurt de nodige

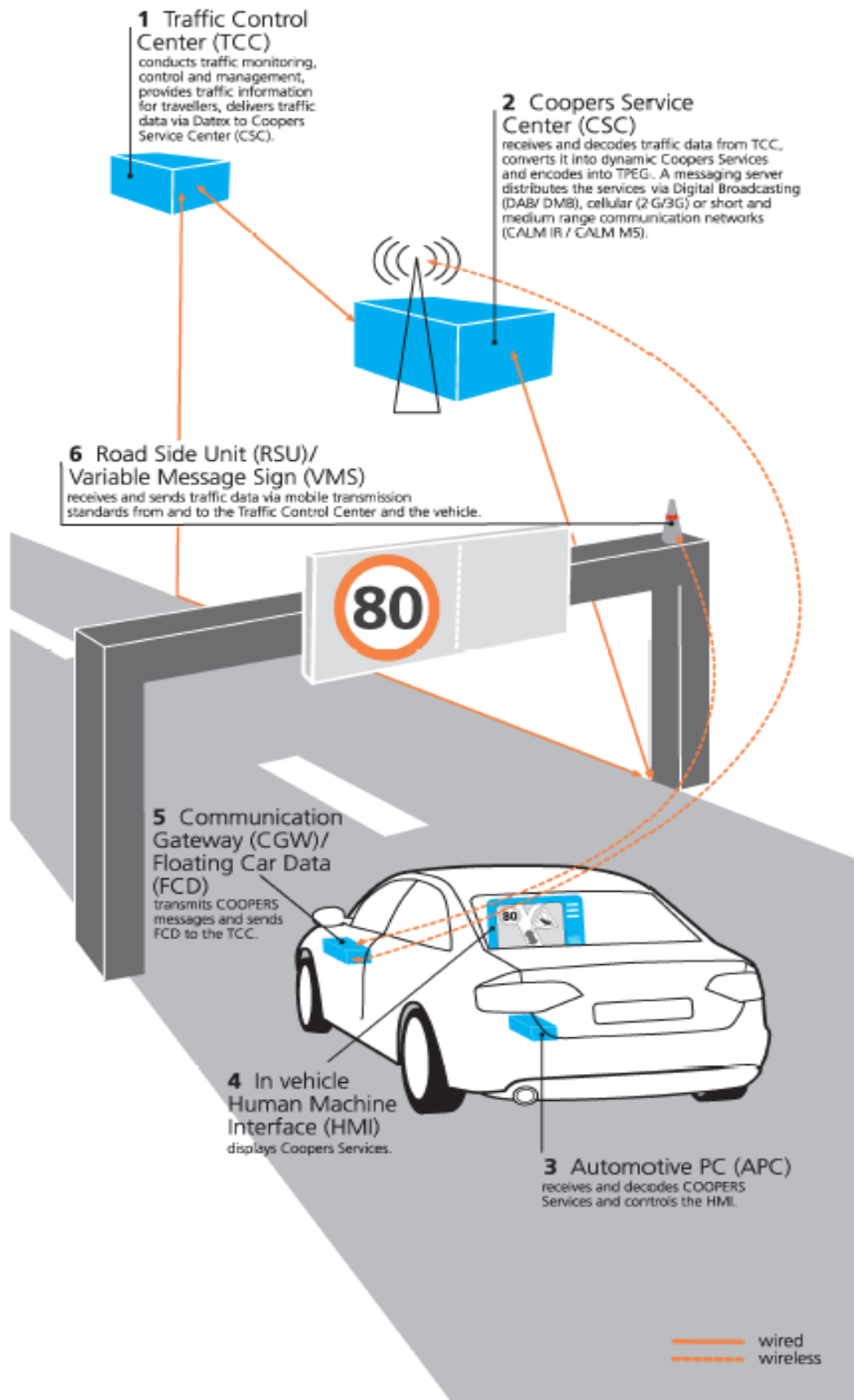


Figuur 21: De testtrajecten van COOPERS (COOPERS, 2010)

gegevens naar het *Coopers Service Center* (CSC, (2) in Figuur 22). Het CSC analyseert de gegevens verkregen van het TCC en zet deze om in actuele dynamische informatie. Vervolgens zendt het CSC deze dynamische informatie via draadloze communicatie naar de testvoertuigen. Elk testvoertuig is uitgerust met een *Automotive PC* ((3) in Figuur 22) die de dynamische informatie ontvangt en deze informatie doorstuurt naar de *Human Machine Interface* in het voertuig (HMI, (4) in Figuur 22). Deze HMI toont de dynamische informatie via een beeldscherm aan de bestuurder van het voertuig. Op deze manier krijgt de bestuurder actuele informatie betreffende de verkeerstoestand, de maximum snelheden, de weersvoorspellingen, enzovoort. Het voertuig krijgt niet enkel dynamische gegevens toegestuurd maar verzamelt zelf ook dynamische gegevens. De gegevens die het voertuig verzamelt, worden via de *Communication Gateway* ((5) in Figuur 22) verstuurd naar het CSC en de *Road Side Units* (RSU, (6) in Figuur 22). De RSU en/of dynamische verkeersborden ontvangen en verzenden dynamische informatie en gegevens van en naar de voertuigen, het TCC en het CSC. Deze RSU fungeren als het ware als router. De dynamische verkeersborden passen zich automatisch aan naargelang de verkeersinformatie en brengen de dynamische informatie visueel over aan bestuurders. Op deze manier verkrijgen ook bestuurders die niet beschikken over een HMI toch dynamische verkeersinformatie. (COOPERS, 2010)

De onderzoekers van COOPERS konden na afloop van het project besluiten dat het systeem uitermate goed werkt. Hoewel het systeem uit veel infrastructuur, hardware en software opgebouwd is, bleek het systeem gedurende maanden stabiel te kunnen werken. Doordat het systeem bovendien werkzaam bleek bij verschillende infrastructuur en communicatiestandaarden, kan het systeem relatief gemakkelijk op elke snelweg in Europa opgebouwd worden. Bovendien bleek dat het systeem kan zorgen voor een veiliger verkeersnetwerk. (COOPERS, 2010)

Hoewel dit project vooral doelde op de verkeersveiligheid, zijn het onderzoek en de resultaten toch belangrijk voor het gebruik van vernieuwende communicatietechnologieën voor een gedistribueerde aanpak van rittenplanning. COOPERS toont namelijk dat het mogelijk is om een communicatienetwerk op te stellen om dynamische gegevens te verzamelen en te verspreiden. Niet enkel verkeersinformatie kan verspreid worden door middel van COOPERS, maar ook andere dynamische gegevens aangaande ladingen, nieuwe of gewijzigde bestellingen, enzovoort. Wel dient opgemerkt dat COOPER uitsluitend *vehicle-to-infrastructure* communicatie betrof en dat geen onderzoek gedaan werd naar *vehicle-to-vehicle* communicatie. Toch kan dit project een grote stap betekenen naar een gedistribueerde aanpak van rittenplanning.



Figuur 22: De elementen van COOPERS (COOPERS, 2010)

4.2.2 Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems (CVIS)

Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems (CVIS) is een Europees project, opgestart begin 2006 en midden 2010 beëindigd. In totaal werd een budget van ongeveer 42 miljoen euro besteed om de systemen van CVIS volledig te testen (CVIS, 2008). Het project had als doel om de manier waarop bestuurders, voertuigen, ladingen en infrastructuur op elkaar inwerken te herontwerpen. CVIS ontwierp hiervoor een infrastructuur en een systeem waarmee zowel V2V als V2I als *infrastructure-to-infrastructure (I2I)* communicatie mogelijk is. Bovendien werden enkele applicaties onderzocht voor onder andere het vervoer van gevaarlijke producten, verbeterd bewustzijn van de bestuurder en strategische rittenplanning. Bij deze laatstgenoemde werd onderzocht of CVIS in staat was om strategieën uit te werken om individuele routes te optimaliseren, rekening houdende met dynamische gegevens en met de routes van andere voertuigen. Om voertuigen voortdurend verbonden te houden, ontwikkelde CVIS eveneens een mobiele router die naadloos kan schakelen tussen verschillende vormen van draadloze communicatie, zoals onder andere mobiele telefonie, draadloos *Local Area Network*, radiosignalen en infrarood. (CVIS, 2008, 2010a, 2010b)

De infrastructuur waarmee CVIS werkt is zeer uiteenlopend. In zekere zin is CVIS een zeer uitgebreid communicatienetwerk waarin voertuigen, ladingen en infrastructuur door middel van diverse communicatiemiddelen in contact staan met elkaar en dynamische gegevens verzamelen en verspreiden. Het gehele project met inbegrip van de applicaties en infrastructuur werd getest in zeven Europese landen: België, Duitsland, Frankrijk, Italië, Nederland, het Verenigd Koninkrijk en Zweden. (CVIS, 2008, 2010a, 2010b)

Na afronding van het CVIS project konden enkele belangrijke conclusies gemaakt worden aangaande de mogelijkheden van het systeem. Niet enkel de opzet en infrastructuur van het systeem bleek werkzaam, ook vele applicaties bleken nuttig voor een beter, veiliger en efficiënter verloop van de verkeersstromen (CVIS, 2010a). Hierna volgend worden enkele applicaties van CVIS aangehaald die relevant zijn voor deze masterproef.

Een belangrijke relevante applicatie is *Strategic Routing*. Onderzoekers stellen dat de hedendaagse navigatiesystemen slecht omgaan met dynamische gegevens. Ze stellen de individuele gebruiker enkel in staat om drukke punten of congestie te vermijden. Maar doordat dit gebeurt voor vele bestuurders tegelijk, verschuiven deze navigatiesystemen de drukke punten of de congestie. Op deze manier verhelpen de navigatiesystemen het probleem niet, maar verschuiven ze het. De *Strategic Routing* applicatie van CVIS houdt bij het berekenen van een individuele route rekening met alle

andere berekende routes. Met andere woorden berekent CVIS een optimale individuele route voor alle voertuigen waarbij het alle routes in evenwicht brengt. Zo verkrijgt CVIS een optimale oplossing voor het wegennetwerk. De *Strategic Routing* applicatie werd uitvoerig getest en geconcludeerd werd dat op alle geteste routes zowel de individuele reistijd als de collectieve reistijd van alle bestuurders verlaagd kon worden door gebruik te maken van de applicatie. (CVIS, 2010a)

Een andere relevante applicatie betreft het zogenaamde snelheidsprofiel. Elke bestuurder krijgt op een beeldscherm een optimale snelheid te zien. Indien de bestuurder deze optimale snelheid hanteert, zal hij het volgende verkeerslicht kruisen bij groen licht. Hierdoor zal de bestuurder minder brandstof verbruiken, minder tijd verspillen bij rood licht en bovendien zal de gehele verkeersstroom verbeteren. De testen toonden aan dat een voertuig dat zich aan zijn snelheidsprofiel houdt zijn reistijd tot 15% kan verlagen. Bovendien bleek het systeem in staat om voor elke bestuurder, met en zonder snelheidsprofiel, een tijdwinst van vijf seconden bij elk verkeerslicht te bereiken. (CVIS, 2010a)

Het reserveren van parkeerzones door transportvoertuigen is een derde relevante applicatie. Deze applicatie stelt bestuurders of beheerders van transportvoertuigen in staat om op voorhand laad- en losplaatsen of parkeerzones te reserveren, rekening houdende met de door het systeem berekende aankomsttijd. De reservatie wordt actueel gehouden en indien het reserverende voertuig bijvoorbeeld vertraging oploopt, verschuift de reservatie mee. Indien een voertuig zich in de laad- en losplaats of parkeerzone bevindt, maakt een parkeersensor contact met het voertuig. Aan de hand van gegevens van het voertuig kijkt de sensor of het voertuig de parkeerzone gereserveerd heeft. Indien dit niet zo blijkt, stuurt de parkeersensor de gegevens door naar de bevoegde instanties die de bestuurder beboeten. Op deze manier dienen bestuurders geen parkeerplaatsen te zoeken en wordt zo bespaard op levertijd, brandstofverbruik en uitstoot. (CVIS, 2010a)

Een vierde en laatste relevante applicatie betreft het toegangscontrolesysteem. De CVIS computer in elk voertuig bevat gegevens over alle mogelijke eigenschappen van het voertuig, zoals soort voertuig, soort lading, gewicht, breedte, lengte, hoogte, uitstoot, enzovoort. Indien een voertuig een bepaalde stad of omgeving nadert, wordt de computer geüpdate met alle mogelijke beperkingen die zich in die stad of omgeving voordoen. Zo weet de computer waar bijvoorbeeld een maximumbreedte of maximumhoogte van toepassing is of waar bepaalde soorten voertuigen of ladingen niet mogen passeren. Het computersysteem bekijkt of op de huidige route zulke beperkingen van toepassing zijn en of de eigenschappen van het voertuig deze beperkingen zullen overschrijden. Indien nodig kan het computersysteem een ander route berekenen of de bestuurder waarschuwen. (CVIS, 2010a)

Het CVIS project blijkt een zeer belangrijk project te zijn voor een gedistribueerde aanpak van rittenplanning. De resultaten van het project tonen immers aan dat met behulp van de CVIS infrastructuur het verzamelen en verspreiden van dynamische gegevens mogelijk is (CVIS, 2010a). Maar ook de CVIS applicaties zijn zeer waardevolle prototypes. Deze applicaties zetten immers een eerste grote stap richting het verzamelen en gebruiken van dynamische gegevens. *Strategic Routing*, het snelheidsprofiel, parkeerzonerreservatie en het toegangscontrolesysteem zijn immers applicaties die zeer nuttig kunnen zijn voor het hanteren van een gedistribueerde aanpak van rittenplanning. Door het gebruik van deze applicaties weet een vrachtwagen immers waar hij mag rijden en waar niet, kan waardevolle tijd gewonnen worden met het hanteren van een optimale snelheid en het reserveren van parkeerzones, maar vooral met *Strategic Routing*. Deze laatste is de belangrijkste aangezien dit systeem alle routes op elkaar afstemt om zo een optimaal geheel te bekomen.

4.2.3 European Field Operational Test on Safe, Intelligent and Sustainable Road Operation (FOTsis)

European Field Operational Test on Safe, Intelligent and Sustainable Road Operation (FOTsis) is een Europees project dat 1 april 2011 opgestart werd en 30 september 2014 als voorziene einddatum heeft. Het project heeft momenteel een totaal budget van 13,8 miljoen euro ter beschikking en is actief in acht Europese landen: België, Duitsland, Finland, Frankrijk, Griekenland, Oostenrijk, Portugal en Spanje. FOTsis heeft als doel om de weginfrastructuur en managementsystemen te testen voor de werking van zeven bijna gecommmercialiseerde coöperatieve V2V, V2I en I2I technologieën en om hun effectiviteit en mogelijkheid tot volledige implementatie in Europa na te gaan. (Cacheiro, et al., 2012; FOTsis, 2013)

De zeven coöperatieve technologieën die FOTsis onderzoekt zijn: *Emergency Management*, *Safety Incident Management*, *Intelligent Congestion Control*, *Dynamic Route Planning*, *Special Vehicle Tracking*, *Advanced Enforcement* en *Infrastructure Safety Assessment*. Hiervoor zal FOTsis de weginfrastructuur en communicatienetwerken onderzoeken die nodig zijn om de communicatie tussen infrastructuur en voertuigen mogelijk te maken (Cacheiro, et al., 2012; FOTsis, 2013). Twee van de zeven onderzochte technologieën zijn relevant voor het mogelijk maken van een gedistribueerde aanpak van rittenplanning, namelijk *Intelligent Congestion Control* en *Dynamic Route Planning*. Deze technologieën maken het mogelijk om dynamische gegevens die verzameld worden door zowel infrastructuur als voertuigen te incorporeren in de rittenplanning. Zo worden dynamische

routes verkregen die rekening houden met huidige en toekomstige congestie of andere dynamische gebeurtenissen zoals slecht weer. (Cacheiro, et al., 2012; FOTsis, 2013)

Hoewel nog geen resultaten bekend zijn van de testen die FOTsis voert, kan toch geconcludeerd worden dat FOTsis een belangrijke bijdrage kan leveren om een gedistribueerde aanpak van rittenplanning in logistieke netwerken mogelijk te maken.

4.2.4 Conclusie

Vele proefprojecten zijn al afgerond maar ook vele proefprojecten zijn nog steeds lopende of moeten nog opgestart worden. Al deze proefprojecten doen onderzoek naar de communicatiemogelijkheden tussen voertuigen en infrastructuur om de verkeersstromen veiliger en vlotter te laten verlopen. Vele van deze proefprojecten zijn op de één of andere manier indirect verbonden met het onderzoek naar een gedistribueerde aanpak van rittenplanning in logistieke netwerken. Hoewel de nadruk bij vele proefprojecten ligt op veiligheid en/of het voorkomen van congestie, zijn de methoden die hiervoor gebruikt worden eveneens bruikbaar voor het hanteren van een gedistribueerde aanpak van rittenplanning. Veel van de afgeronde proefprojecten komen tot het besluit dat de gebruikte technologie al werkt en implementeerbaar is. De dag dat voertuigen en infrastructuur met elkaar zullen communiceren, is hierdoor niet veraf meer. Verwacht wordt dat in de nabije toekomst enkele van de onderzochte technologieën reeds geïmplementeerd zullen worden (FOT-Net, 2013). Echter valt op dat weinig proefprojecten zich uitdrukkelijk richten op het mogelijk maken van een gedistribueerde aanpak van rittenplanning in logistieke netwerken. Hierdoor is het gebruik van hedendaagse communicatietechnologieën voor een gedistribueerde aanpak van rittenplanning in logistieke netwerken nog niet haalbaar. (FOT-Net, 2013)

Algemene conclusie

Naar communicatiemiddelen die specifiek bedoeld zijn om een gedistribueerde aanpak van rittenplanning en ladingkeuze in logistieke netwerken te voeren, is nog niet veel onderzoek gevoerd. Wel zijn tal van onderzoeken gevoerd naar communicatiemiddelen die kunnen helpen om de verkeersstromen veiliger en vlotter te doen verlopen. Daar deze onderzoeken mits kleine aanpassingen een gedistribueerde aanpak mogelijk maken, kunnen deze onderzoeken toch als nuttig beschouwd worden voor het onderzoek naar een gedistribueerde aanpak van rittenplanning.

Van de twee soorten methoden, infrastructuurvrije en infrastructuurgebaseerde, zijn de infrastructuurgebaseerde methoden het meest gevorderd. Bovendien zijn deze infrastructuurgebaseerde methoden het meest uiteenlopend aangaande de theoretische kaders en de gebruikte technologieën. Testprojecten als CVIS en COOPERS tonen aan dat infrastructuurgebaseerde methoden een zeer stabiele en goede werking vertonen. Echter kan ook geconcludeerd worden dat werken met alleen infrastructuurgebaseerde methoden zeer kostelijk is en deze methoden hierdoor minder geschikt zijn om op grote schaal toe te passen. Toch blijken talrijke bedrijven als INRIX, TomTom en Cellint gebruik te maken van infrastructuurgebaseerde communicatietechnologieën om verkeersinformatie te verschaffen. Hierbij dient echter opgemerkt te worden dat deze bedrijven enkel gebruik maken van eenzijdige communicatietechnologieën terwijl een gedistribueerde aanpak van rittenplanning tweezijdige communicatie vraagt.

Waar redelijk veel theoretische kaders geschetst zijn rond infrastructuurvrije methoden zijn er nog geen noemenswaardige testprojecten op gang gezet. Dit komt doordat de infrastructuurvrije methoden nog niet volledig op punt staan en nog tal van theoretische problemen vertonen. Toch kan geconcludeerd worden dat infrastructuurvrije methoden geschikter zijn dan infrastructuurgebaseerde methoden om een gedistribueerde aanpak van rittenplanning en ladingkeuze te voeren. Maar vooraleer de infrastructuurvrije methoden ook daadwerkelijk gebruikt kunnen worden dienen de problemen rond het zendbereik en de belasting van het draadloze communicatienetwerk verholpen te worden.

Een combinatie van infrastructuurvrije en infrastructuurgebaseerde methoden lijkt voor een optimale oplossing te zorgen waarin een gedistribueerde aanpak van rittenplanning en ladingkeuze mogelijk is. Enkele theoretische kaders tonen immers aan dat de combinatie van beide methoden de

nadelen van elke methode, de hoge kosten van infrastructuurgebaseerde methoden en het kleine zendbereik en grote netwerkbelasting van infrastructuurvrije methoden, beperkt. Toch zijn nog geen noemenswaardige testprojecten op gang gezet om een combinatie van beide methoden te testen, wat opnieuw verklaard wordt door de infrastructuurvrije communicatiemethoden die nog niet volledig op punt staan.

De algemene conclusie van deze masterproef luidt dat reeds vele theoretische denkkaders geschetst zijn die indirect een gedistribueerde aanpak van rittenplanning in logistieke netwerken mogelijk maakt. Bovendien tonen testprojecten aan dat bepaalde technologieën een stabiele werking vertonen en op dit moment al implementeerbaar zijn. Toch is verder onderzoek nodig om de communicatietechnologieën nodig voor een gedistribueerde aanpak van rittenplanning in logistieke netwerken op punt te stellen.

Lijst der geraadpleegde werken

- AirSage. (2013a). *Using Wireless Signals to Define Locations*. Opgeroepen op 03 mei, 2013, van <http://www.airsage.com/Technology/How-it-works/>
- AirSage. (2013b). *How We Analyze Mobile Data*. Opgeroepen op 23 maart, 2013, van <http://www.airsage.com/Technology/>
- Anda, J., LeBrun, J., Ghosal, D., Chuah, C.-N., & Zhang, M. (2005). VGrid: Vehicular AdHoc Networking and Computing Grid for Intelligent Traffic Control. *IEEE 61st Vehicular Technology Conference*, (pp. 2905 - 2909). Stockholm, Sweden.
- Atkinson, M. I., Adam, W. B., & Dixon, J. M. (2004). *Patentnr. EP 1348208 B1*.
- Berg Inside AB. (2010). *GPS and Mobile Handsets*. Opgeroepen op 12 februari, 2013, van <http://www.bergsight.com/ReportPDF/ProductSheet/bi-gps4-ps.pdf>
- Briesemeister, L., Schäfers, L., & Hommel, G. (2000). Disseminating Messages among Highly Mobile Hosts based on Inter-Vehicle Communication. *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000* (pp. 522 - 527). Verenigde Staten: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Cacheiro, E., García-Linares, F., Iturriaga, J. L., Frutos, I. d., Cano, E., Basabe, A., . . . Alfonso, J. (2012). *FOTsis D1.1 Project Presentation*. Opgeroepen op 17 mei, 2013, van <http://www.fotsis.com/index.php/library/deliverables-old?download=35:d11-m12-project-presentation>
- Cellint. (2010). *Company Overview*. Opgeroepen op 26 maart, 2013, van http://www.cellint.com/about_us/about_us.html
- Cellint. (2012). *TrafficSense - Road Traffic Monitoring and Traffic Information Services*. Opgeroepen op 18 maart, 2013, van http://www.cellint.com/traffic_data/traffic_system.html
- Chen, W., & Cai, S. (2005). Ad Hoc Peer-to-Peer Network Architecture for Vehicle Safety Communications. *IEEE Communications Magazine*, 43(4), 100-107.
- COOPERS. (2010, juni 10). *Final report on demonstration*. Opgeroepen op 13 mei, 2013, van http://www.coopers-ip.eu/fileadmin/results/deliverables/D6100_-_Final_report_on_demonstrations_V1_0.pdf

- Covaciu, D., Florea, D., Preda, I., & Timar, J. (2008). *Using GPS Devices for Collecting Traffic Data*. Craiova: University of Craiova.
- CVIS. (2008). *Cooperating for Mobility*. Opgeroepen op 16 mei, 2013, van http://www.cvisproject.org/download/cvis_brochure_May2008_Final.pdf
- CVIS. (2010a, maart). *The New Cooperative Era*. Opgeroepen op 16 mei, 2013, van http://www.cvisproject.org/download/ERT_CVIS_FinalProject_Bro_06_WEB.pdf
- CVIS. (2010b, mei). *Cooperative Urban Mobility*. Opgeroepen op 16 mei, 2013, van http://www.cvisproject.org/download/CVIS_Handbook_FINAL%20Version.pdf
- Dikaiakos, M. D., Florides, A., Nadeem, T., & Iftode, L. (2007). Location-Aware Services over Vehicular Ad-Hoc Networks using Car-to-Car Communication. *IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS*, 25(8), 1590-1602.
- Ding, J.-W., Wang, C.-F., Meng, F.-H., & Wu, T.-Y. (2010). Real-time vehicle route guidance using vehicle-to-vehicle communication. *IET Communications*, 4, 870–883.
- eurostat. (2012, oktober 16). *Freight transport statistics*. Opgeroepen op 22 februari, 2013, van http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Freight_transport_statistics
- Faccio, M., Persona, A., & Zanin, G. (2011). Waste collection multi objective model with real time traceability data. *Waste Management*, 31, 2391–2405.
- Fleischmann, B., Gietz, M., & Gnutzmann, S. (2004). Time-Varying Travel Times in Vehicle Routing. *Transportation Science*, 38, 160–173.
- Fleischmann, B., Sandvoß, E., & Gnutzmann, S. (2004). Dynamic Vehicle Routing. *Transportation Science*, 38(2), 160–173.
- FOT-Net. (2013). *FOT-Net*. Opgeroepen op 17 mei, 2013, van http://www.fot-net.eu/en/welcome_to_fot-net.htm
- FOTsis. (2013). *FOTsis*. Opgeroepen op 17 mei, 2013, van <http://www.fotsis.com/>
- Fürstenberg, K., Hipp, J., & Liebram, A. (2000). A Laser Scanner for Detailed Traffic Data Collection and Traffic Control. *Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Systems*. Turijn, Italië.

- Ghiani, G., Guerriero, F., Laporte, G., & Musmanno, R. (2003). Real-time vehicle routing: Solution concepts, algorithms and parallel computing strategies. *European Journal of Operational Research*, 151(1), 1-11.
- Giaglis, G., Minis, I., Tatarakis, A., & Zaimpekis, V. (2004). Minimizing logistics risk through real-time vehicle routing and mobile technologies - Research to date and future trends. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 34(9), 749-764.
- Global Commerce Initiative & Capgemini. (2008). *Future Supply Chain 2016*.
- Herrera, J. C., Work, D. B., Herring, R., Ban, X., Jacobson, Q., & Bayen, A. M. (2010). Evaluation of Traffic Data Obtained via GPS-enabled Mobile Phones: the Mobile Century field experiment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(4), 568-583.
- Hoh, B., Gruteser, M., Herring, R., Ban, J., Work, D., Herrera, J.-C., . . . Jacobson, Q. (2008). Virtual trip lines for distributed privacy-preserving traffic monitoring. *6th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, (pp. 15-28). Breckenridge.
- Hsiao, W. C., & Chang, S. K. (2005). Segment based Traffic Information Estimation Method Using Cellular Network Data. *Proceedings of the 8th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, (pp. 44-49). Vienna.
- INRIX. (2013a). *Who We Are*. Opgeroepen op 06 mei, 2013, van <http://inrix.com/companyoverview.asp>
- INRIX. (2013b). *We're the traffic experts, so you don't have to be*. Opgeroepen op 05 mei, 2013, van <http://inrix.com/trafficinformation.asp>
- INRIX. (2013c). *Directions & Driver Services*. Opgeroepen op 05 mei, 2013, van <http://www.itisholdings.com/directions-driverservices.asp>
- Intelligent Mechatronic Systems. (2012). *The IMS Story - Past, Present, Future*. Opgeroepen op 15 maart, 2013, van http://www.intellimec.com/wp-content/uploads/downloads/2012/11/IMS_Story_11_12.pdf
- Intelligent Mechatronic Systems. (2013). *Traffic Intelligence - Get on top of traffic before it slows you down*. Opgeroepen op 15 maart, 2013, van <http://www.intellimec.com/m2m-telematics/traffic/>
- Jerbi, M., Senouci, S.-M., Rasheed, T., & Ghamri-Doudane, Y. (2007). An Infrastructure-Free Traffic Information System for Vehicular Networks. *Vehicular Technology Conference*, 2086 - 2090.

- Kitani, T., Shibata, N., Shinkawa, T., Yasumoto, K., Ito, M., & Higashino, T. (2008). Efficient VANET-based Traffic Information Sharing using Buses on Regular Routes. *2008 IEEE 67th Vehicular Technology Conference-Spring*, (pp. 3031 - 3036). Marina Bay, Singapore.
- Leduc, G. (2008). Road traffic data: Collection methods and applications. *Working Papers on Energy, Transport and Climate Change*, 1, 55.
- Mediamobile. (2013a). *Data Quality*. Opgeroepen op 29 maart, 2013, van <http://www.mediamobile.com/en/about-mediamobile/data-quality.html>
- Mediamobile. (2013b). *Products & Services*. Opgeroepen op 23 maart, 2013, van <http://www.mediamobile.com/en/products-a-services/about-our-products.html>
- Nadeem, T., Dashtinezhad, S., Liao, C., & Iftode, L. (2004). TrafficView: Traffic Data Dissemination using Car-to-Car Communication. *Mobile Computing and Communications Review*, 8(3), 6-19.
- Pfliegl, R. (2010). *COOPERS Project Presentation*. Opgeroepen op 10 mei, 2013, van http://www.coopers-ip.eu/fileadmin/results/deliverables/D1-A1100_COOPERS_Project_Presentation_052010.pdf
- RFID Journal LLC. (sd). *The Basics of RFID Technology*. Opgeroepen op 18 februari, 2013, van RFID Journal: <http://www.rfidjournal.com/article/view/1337/1>
- Roberts, C. (2006). Radio Frequency Identification (RFID). *Computers & Security*, 25(1), 18–26.
- Rose, G. (2006). Mobile Phones as Traffic Probes: Practices, Prospects and Issues. *Transport Reviews*, 26(3), 275–291.
- Sago, H., Shinohara, M., Hara, T., & Nishio, S. (2007). Effective Data Dissemination for Information Sharing Based on Inter-Vehicle Communication. *Journal of Interconnection Networks*, 8(4), 337-354.
- Sanwal, K. K., & Walrand, J. (1995). *Vehicles as Probes*. California, Berkeley: California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH).
- Schrank, D., & Lomax, T. (2007). *The 2007 Annual Urban Mobility*. Texas Transportation Institute.
- Secretariaat van de Mobiliteitsraad van Vlaanderen. (2009). *Mobiliteitsrapport van Vlaanderen*.
- Shibata, N., Terauchi, T., Kitani, T., Yasumoto, K., Ito, M., & Higashino, T. (2006). A Method for Sharing Traffic Jam Information using Inter-Vehicle Communication (Invited Paper). *3rd Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems*, (pp. 1 - 7). San Jose, California.

- Sirit Inc. (2005). *IDentity FleX Traffic Probe*. Opgeroepen op 25 maart, 2013, van http://www.sirit.com/Case_Studies/ds_flextp.pdf
- Sirit Incorporation. (2013). *About Sirit*. Opgeroepen op 25 maart, 2013, van <http://www.sirit.com/company.asp>
- Taniguchi, E., & Shimamoto, H. (2004). Intelligent Transportation System based Dynamic Vehicle Routing and Scheduling with Variable Travel Times. *Transportation Research Part C*, 12(3), 235-250.
- TomTom. (2011). *On a mission to reduce traffic congestion for all*. Opgeroepen op 27 maart, 2013, van http://www.tomtom.com/landing_pages/trafficmanifesto/index-project.php?Lid=1
- TomTom. (2013). *TomTom HD Traffic - Navigate with up-to-the-minute information*. Opgeroepen op 23 maart, 2013, van http://www.tomtom.com/en_gb/images/2013.03.I.HD.EN.pdf
- TomTom. (z.d.). *White paper - How TomTom's HD Traffic™ and IQ Routes™ data provides the very best routing*. Opgeroepen op 23 maart, 2013, van http://www.tomtom.com/lib/doc/download/HDT_White_Paper.pdf
- Tong, D., Merry, C. J., & Coifman, B. (2006). Traffic Information Deriving Using GPS Probe Vehicle Data Integrated with GIS. *GIS for Transportation Symposium*, 27-29.
- Toth, P., & Vigo, D. (2002). *The Vehicle Routing Problem*. Society for Industrial and Applied Mathematics,.
- Urban Informatics. (2013). *Informatics Data*. Opgeroepen op 24 maart, 2013, van <http://www.uinformatics.com/explore-ui/informatics-data>
- Ustundag, A., & Cevikcan, E. (2008). Vehicle Route Optimization for RFID Integrated Waste Collection System. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 7(4), 611–625.
- VOKA & BECI. (2010). *De Brusselse Mobiliteitsknoop Ontwarren*. Brussel: Brussels Metropolitan.
- Wang, L., Kwok, S., & Ip, W. (2010). A radio frequency identification and sensor-based system for the transportation of food. *Journal of Food Engineering*, 101, 120-129.
- Weinstein, R. (2005). RFID: A Technical Overview and Its Application to the Enterprise. *IT Pro*, 27-33.
- Wen, W. (2010). An intelligent traffic management expert system with RFID technology. *Expert Systems with Applications*, 37, 3024–3035.

- Wenning, B.-L., Pesch, D., & Timm-Giel, A. (2006). A Distributed Routing Approach for Vehicle Routing in Logistic Networks. *Proceedings of the IEEE 64th Vehicular Technology Conference*.
- Wischhof, L., Ebner, A., Rohling, H., Lott, M., & Halfmann, R. (2003). SOTIS – A Self-Organizing Traffic Information System. *Vehicular Technology Conference, 4*, 2442 - 2446.
- Wycisk, C., McKelvey, B., & Hülsmann, M. (2008). "Smart parts" supply networks as complex adaptive systems: analysis and implications. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 38*(2), 108-125.
- Zhang, X., Hong, J., Fan, S., Wei, Z., Cao, J., & Ren, Y. (2007). A Novel Real-time Traffic Information System Based on Wireless Mesh Networks. *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, (pp. 618 - 623). Seattle.

Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:

Communicatietechnologie voor een gedistribueerde aanpak van rittenplanning in logistieke netwerken

Richting: **master in de toegepaste economische wetenschappen: handelsingenieur-operationeel management en logistiek**

Jaar: **2013**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

Creemers, Wouter

Datum: **2/06/2013**