

ITS-technieken om verkeersveiligheid te verhogen op kruispunten met verkeerslichten (VRI's)

Onderzoek naar de mogelijkheden van dynamisch snelheidsadvies op VRI's

J. De Mol, W. Vandenberghe, S. Vlassenroot, K. De Baets

- PROMOTOR ▶ Prof. dr. G. Allaert, Prof. dr. ir. P. Demeester, Prof. dr. ir. I. Moerman
ONDERZOEKSLIJN ▶ Innovatie en ICT voor een veiligere mobiliteit
ONDERZOEKSGROEP ▶ UGent, UHasselt, VUB, PHL, VITO
RAPPORTNUMMER ▶ RA-MOW-2009-010

**WETENSCHAPSPARK 5
B 3590 DIEPENBEEK**

- T ▶ 011 26 91 12
F ▶ 011 26 91 99
E ▶ info@steunpuntmowverkeersveiligheid.be
I ▶ www.steunpuntmowverkeersveiligheid.be

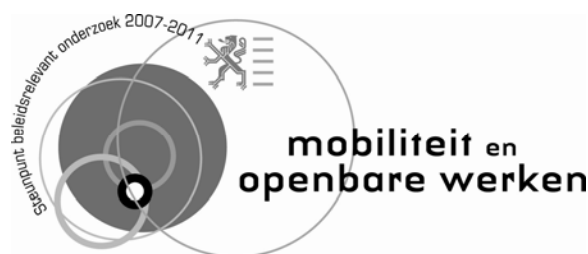
ITS-technieken om verkeersveiligheid te verhogen op kruispunten met verkeerslichten (VRI's)

Onderzoek naar de mogelijkheden van dynamisch snelheidsadvies op VRI's

RA-MOW-2009-010

J. De Mol, W. Vandenberghe, S. Vlassenroot, K. De Baets

Onderzoekslijn Innovatie en technologie voor een veiligere mobiliteit



DIEPENBEEK, 2009.
STEUNPUNT MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN
SPOOR VERKEERSVEILIGHEID

Documentbeschrijving

Rapportnummer: RA-MOW-2009-010

Titel: ITS-technieken om verkeersveiligheid te verhogen op kruispunten met verkeerslichten (VRI's)

Ondertitel: Onderzoek naar de mogelijkheden van dynamisch snelheidsadvies op VRI's

Auteur(s): J. De Mol, W. Vandenberghe, S. Vlassenroot, K. De Baets

Promotor: Prof. dr. G. Allaert, Prof. dr. ir. P. Demeester, Prof. dr. ir. I. Moerman

Onderzoekslijn: Innovatie en technologie voor een veiligere mobiliteit

Partner: Universiteit Gent (Instituut voor Duurzame Mobiliteit)

Aantal pagina's: 81

Projectnummer Steunpunt: 4.1

Projectinhoud: Onderzoek naar concrete ITS-toepassingen met effect op verkeersveiligheid. Deel: Dynamisch snelheidsadvies op VerkeerRegelInstallatie.

Uitgave: Steunpunt Mobiliteit & Openbare Werken – Spoor Verkeersveiligheid, augustus 2009.

Steunpunt Mobiliteit & Openbare Werken
Spoor Verkeersveiligheid
Wetenschapspark 5
B 3590 Diepenbeek

T 011 26 91 12
F 011 26 91 99
E info@steunpuntmowverkeersveiligheid.be
I www.steunpuntmowverkeersveiligheid.be

Samenvatting

Dit rapport sluit aan bij het rapport ITS en Verkeersveiligheid, Intelligent Transport Systemen, RA-MOW-2008-007 en vormt een specifieke uitwerking van de mogelijkheden die ITS systemen bieden voor de verhoging van de verkeersveiligheid op kruispunten. De kans dat op kruispunten meer verkeersongevallen plaatsvinden dan op andere wegsegmenten lijkt voor de hand te liggen, aangezien verschillende weggebruikers elkaar kunnen kruisen. In dit rapport wordt aan de hand van ongevalstatistieken aangetoond dat het beveiligen van kruispunten inderdaad een sterke verhoging van de verkeersveiligheid met zich meebrengt, en wordt het gebruik van Intelligente Transport Systemen (ITS) geïntroduceerd als nieuwe maatregel om kruispunten met verkeersregelinstantie veiliger te maken. Een gedetailleerde technische beschrijving wordt gegeven van de mogelijke communicatietechnieken ter ondersteuning van zulke systemen. Tenslotte wordt een uitgebreid overzicht gegeven van de stand van zaken in de meest relevante gerelateerde onderzoeksprojecten.

Uit de **ongevalcijfers** op kruispunten blijkt dat zowel ongevallen met gewonden als ongevallen met doden voor een belangrijk deel te maken hebben met kruispunten. Voor EU-13 vertegenwoordigt dit 5.476 doden of 21,3 % van alle verkeersdoden. In België is het aandeel van de doden op kruispunten 19,3 % van het totaal aantal verkeersdoden. Wanneer dit uitgezet wordt per 1.000.000 inwoners dan heeft België het vijfde hoogst aantal doden op kruispunten; dit is na Italië, Hongarije, Estland en Polen. Wanneer men dit stelt tegen het gemiddelde van EU-13 en ook van EU-16 dan is het Belgische cijfer, 20 dodelijke ongevallen per 1.000.000 inwoners, hoger dan deze gemiddelden (respectievelijk 18,1 en 19 dodelijke ongevallen). In het Intersafe-project (binnen het PReVENT project) wordt voor drie landen (Frankrijk, Groot-Brittannië en Duitsland) het percentage van het aantal doden en gewonden op kruispunten aangeduid. Men kan vaststellen dat ongeveer 30 tot 60 % van alle ongevallen met gewonden op kruispunten vallen; voor dodelijke ongevallen is dit tussen de 16 à 36 %. In deze indeling worden verschillende ongevalsscenario's geanalyseerd.

Wanneer men dieper ingaat op de analyse van rood licht negatie, dan kan men opmaken dat de kritieke situatie kan worden voorkomen indien de bestuurder vroeger kan geïnformeerd en gewaarschuwd worden. Er moet echter wel worden gegarandeerd dat deze informatie of waarschuwing niet leidt tot extra gevaarlijk risicogedrag. In wezen zou men de ontvangen informatie namelijk kunnen interpreteren als "even extra gas bij en ik haal het licht wel". In dit geval wordt de kans op ongevallen met nog zwaardere gevolgen dan ook reëel. Er moet dan ook voldoende aandacht besteed worden aan deze problematiek.

Het bovenstaande toont aan dat het beveiligen van kruispunten een prioriteit in het verkeersveiligheidsbeleid zou moeten zijn. Extra aandacht zou hierbij moeten gegeven worden aan het voorkomen van rood licht rijden, omdat dit een belangrijk onderdeel is van de gevaarlijke overtredingen.

Bestaand onderzoek werd gevonden dat aantoont dat er een **verband is tussen het type kruispunt en de mate van verkeers(on)veiligheid** op dat kruispunt. De gevonden studie geeft een kwantitatieve beoordeling van de veiligheid van een aantal kruisingstypen, uitgedrukt in het aantal geregistreerde letselongevallen per miljoen gepasseerde motorvoertuigen. Uit de analyse blijkt dat de kans op een letselongeval het grootst is op kruispunten met verkeerslichten (0.11 letselongeval/miljoen voertuigen), gevolgd door kruispunten op voorrangsweg (0.09), kruispunten met voorrangskruising (0.09), rotondes (0.07) en kruispunten zonder voorrangregeling (0.06). Het gemiddelde aantal slachtoffers per letselongeval neemt af in de volgende volgorde: verkeerslichten, voorrangsweg, voorrangskruising en geen voorrangskruising (respectievelijk: 1,22 / 1,18 / 1,11 / 1,09). De ernst uitgedrukt in aantal ziekenhuisgewonden neemt in die volgorde eerder toe dan af (respectievelijk 17, 16, 18, 18).

Het herinrichten van kruispunten kan dan ook positieve effecten met zich meebrengen. Amerikaans onderzoek van de effecten van het herinrichten van kruispunten in Noord Virginia stelt dat de vertragingen met 62-74 % (naargelang het soort kruispunt) verminderd zouden zijn; dit zijn 300.000 verliesuren op jaarbasis minder. Het jaarlijks minderverbruik zou 200.000 Gallons (757.082 liter) bedragen. De verkeersveiligheid zou drastisch verhogen: het herinrichten van het kruispunt in rotondes zou 62 ongevallen en 41 gewonden minder veroorzaken (vergelijking tussen 1993 en 2003 met vijf kruispunten waarvoor ongevaldata beschikbaar was).

Een logische **maatregel** voor het verhogen van de verkeersveiligheid op kruispunten is dan ook het herinrichten van kruispunten met verkeerslichten of de aanleg van het kruispunt in een rotonde. Daarnaast zijn nog verschillende andere maatregelen mogelijk. Deze kunnen betrekking hebben op de verkeerslichtenregeling, weginrichting (kanalisatie, afslagstroken, fiets- en voetgangersvoorzieningen, versmallingen, ...), verbetering zichtbaarheid, rijopleiding en educatie, snelheidsmanagement in de omgeving van het kruispunt, handhaving (camera's), wegdekbedekking, enz. Deze maatregelen worden nu reeds toegepast in Vlaanderen. Een nieuwe techniek die echter beperkt in aanmerking wordt genomen is het toepassen van **Intelligente Transport Systemen** op kruispunten. Deze aanpak wordt in dit rapport verder onderzocht.

Wanneer verkeersregelinstallaties op kruispunten voorzien worden van intelligente softwaretoepassingen en eventueel sensoren of draadloze communicatie met naburige voertuigen, dan kunnen **applicaties** worden ontwikkeld die op verschillende domeinen grote vooruitgangen boeken. De drie grootste van deze domeinen zijn verkeersveiligheid, doorstroming en het milieu.

Veel onderzoek met betrekking tot intelligente kruispunten richt zich tot een betere doorstroming van het verkeer. Zelforganiserende verkeerslichten verdelen het verkeer op in "platoons" door te tellen (bv gebruik makende van tellusen in het wegdek) hoeveel voertuigen staan te wachten aan het rood licht, en de schakeltijd van de lichten hierop aan te passen. Deze techniek werd in een verkeerssimulator toegepast in de Wetstraat in Brussel, en zou daar de gemiddelde totale reistijden met ongeveer 25% laten zakken. In een ander onderzoek werd een systeem ontwikkeld waarbij elke voertuig een "stem" kan uitbrengen voor het groen schakelen van het verkeerslicht. Hiervoor communiceert hij naar het verkeerslicht zijn identiteit, richting aan het verkeerslicht, positie in de wachtrij en bestemmingsadres. Gebruik makende van deze informatie van alle voertuigen rond het verkeerslicht kan deze berekenen welke schakeling de grootste opgetelde winst voor de voertuigen oplevert. Resultaten toonden een verbetering in de gemiddelde wachttijden voor de voertuigen van 30 tot 50%.

Op het gebied van positieve effecten op de verkeersveiligheid wordt er werk verricht in een aantal Europese projecten zoals PReVENT, Safespot en VII. Veelvoorkomende scenario's die hierbij worden aangepakt zijn het vermijden van of verwittigen voor roodrijden, vermijden van ongevallen met zwakke weggebruikers en het coördineren van linksaf draaien bij aankomend verkeer. Tevens kan ook opgemerkt worden dat de applicaties die mikken op een betere doorstroming tevens een verbetering van de verkeersveiligheid met zich mee brengen.

Met betrekking tot positieve effecten op het milieu is er minder specifiek onderzoek te vinden, maar opnieuw brengen de applicaties met een betere doorstroming ook positieve effecten op het milieu met zich mee.

Wat veel van deze applicaties gemeen hebben is het feit dat ze steunen op **communicatietechnologie**. Er kan een onderscheid gemaakt worden in drie grote groepen: lokale communicatie op korte afstand, cellulaire datanetwerken en digitale broadcasttechnologieën. Wanneer deze worden bekeken in het kader van intelligente

verkeersregelinstallaties, dan vallen zowel de broadcast- als de cellulaire technologieën uit de boot. Dit wegens het one-way karakter van broadcasting, en door de hogere delay en kostprijs bij cellulaire datanetwerken. Dan blijven alleen de lokale communicatie media nog over. Wanneer we hun parameters erop na slaan, blijken deze inderdaad zeer geschikt te zijn: ze zijn interactief, gratis in gebruik, kennen een hoge beschikbare bandbreedte en zijn niet afhankelijk van de dekking voorzien door een netwerkoperator. De gekende technologieën die onder deze categorie vallen zijn **CEN DSRC, IEEE 802.11p, CALM-M5, CALM-IR en IEEE 802.15.4**. Een uitgebreide technische beschrijving van deze communicatiemedia is in het rapport opgenomen.

CEN DSRC wordt typisch gebruikt voor Electronic Toll Collect zoals Télépéage in Frankrijk. Deze is echter niet geschikt voor gebruik in Europese verkeersregelinstallaties omdat deze slechts kan communiceren in één richting. IEEE 802.11p is een aanpassing van de welbekende IEEE 802.11 Wireless LAN technologie (ook gekend onder het WiFi keurmerk) voor gebruik in een voertuigomgeving. Deze technologie is ook niet geschikt voor toepassing in Vlaanderen omdat deze gebruik maakt van de ITS frequenties uit de VS. CALM-M5 is de Europese afgeleide van IEEE 802.11p, en is wel uitermate geschikt. Wel zal deze net als IEEE 802.11p last hebben van schaalbaarheidsproblemen, en moeten hier dus geschikte, schaalbare routeringsprotocollen voor ontwikkeld worden.

Op het gebied van directionele communicatie komen de beide Europese standaarden, CALM-IR en CALM-MM in aanmerking. CALM-IR is een communicatietechniek gebaseerd op infrarood, en is zeer sterk in het afbakenen van communicatiezones. CALM-MM gebruikt frequenties gelijkaardig aan radar, en kan op een gerichte wijze zeer hoge bandbreedtes aanbieden. Op korte tot middellange termijn is CALM-IR wel in het voordeel omdat deze technologie al veel verder ontwikkeld is dan CALM-MM.

IEEE 802.15.4 is een technologie voor gebruik in draadloze sensornetwerken. Hierbij zijn energieverbruik en schaalbaarheid de belangrijkste karakteristieken. Deze technologie is het best geschikt voor gebruik in mobiele toestellen, dus voor het opnemen van de zwakke weggebruiker in het intelligent kruispunt. Vereiste hiervoor is echter wel dat de gebruikte routeringsprotocollen mobiliteit ondersteunen. Dit vraagt om verder onderzoek.

Op korte tot middellange termijn komen dus drie communicatietechnologieën in aanmerking voor de implementatie van intelligente verkeersregelinstallaties: CALM-M5, CALM-IR en IEEE 802.15.4. CALM-M5 is geschikt voor omnidirectionele communicatie met voertuigen, CALM-IR voor directionele communicatie met voertuigen, en IEEE 802.15.4 voor omnidirectionele communicatie met zwakke weggebruikers. Verder onderzoek naar geschikte routeringsprotocollen is wel nodig alvorens CALM-M5 en IEEE 802.15.4 succesvol kunnen worden toegepast in intelligente verkeersregelinstallaties.

Steunend op deze technologische ontwikkelingen wordt in een aantal **onderzoeksprojecten** gekeken naar intelligente kruispunten.

INTERSAFE is een onderdeel van het project PReVENT. De bedoeling is om de bestuurder te informeren en/of te waarschuwen voor verkeerslichten; deze informatie/waarschuwing is zo opgesteld dat de bestuurder kennis heeft van de tijd en de aangewezen snelheid om het kruispunt veilig te kruisen of veilig af te slaan. Door deze informatie/waarschuwing hoopt men conflicten ter hoogte van kruispunten te vermijden. Deze conflicten kunnen ontstaan uit verstrooidheid (niet opmerken van het verkeerslicht, rood of groen licht), onaangepast rijgedrag in functie van de te verwachten rood of groencyclus of onvoldoende zicht op de verkeerslichteninstallatie. Uiteindelijk wordt verwacht dat door deze informatie/waarschuwing de bestuurder het rijgedrag aanpast waardoor de kans op conflicten wordt verminderd. Het aanpassen van dit rijgedrag slaat op het verminderen van snelheid; dit kan langzaam gebeuren of kan eerder naar hevig remmen gaan indien niet tijdig op de informatie/waarschuwing wordt ingegaan.

Twee demonstratievoertuigen werden ontworpen waarop deze techniek werd getest. Via een visuele en akoestische waarschuwing werd een snelheidsadvies gegeven. Met deze

snelheid kon men veilig het kruispunt oversteken. Op de demonstraties in Versailles bleek dat op testwegen dit systeem werkte maar dat zowel door de vrijwilligheid als door de aard van de informatie, de veiligheid op kruispunten met VRI's afhankelijk blijkt van de wijze waarop de bestuurder de informatie/waarschuwing negeert of in aangepast rijgedrag omzet. Uit dit Europees onderzoek blijkt dat mits bepaalde technische verbeteringen ondersteuning van het rijgedrag op kruispunten de verkeersveiligheid kan verhogen.

IRIS is een onderdeel van het project Safespot. IRIS gebruikt voertuig-infrastructuur communicatie om de bewegingen van alle individuele voertuigen te analyseren, en laserscanners om zwakke weggebruikers te identificeren. Het systeem kan dan gebaseerd op deze inputs gevaarlijke situaties op tijd inschatten en de nodige maatregelen nemen om ongelukken te vermijden, zoals het aanpassen van de schakeltijd van de lichten of het sturen van waarschuwing via draadloze communicatie naar human-machine interfaces geïnstalleerd in de voertuigen. Het IRIS systeem richt zich tot drie scenario's die verantwoordelijk zijn voor een significant aandeel van de ongevallen op kruispunten: roodlichtrijden, links afslaan (conflict met aankomend verkeer) en rechts afslaan (conflict met zwakke weggebruikers).

In het project worden experimenten in een rijnsimulator uitgevoerd. Dankzij simulatie is het mogelijk om een meer systematische en uitgebreide analyse van applicaties en hun mogelijke varianten te maken. Vroeg tijdens de ontwikkeling kan simulatie nuttig zijn om de timing van de applicaties te bestuderen, optimale parameter instellingen af te leiden en de potentiële impact van een toepassing in te schatten indien validatie in de echte wereld niet mogelijk is. In parallel met de ontwikkelingen in de simulator wordt ook een echt IRIS systeem gebouwd en getest. In mei 2009 zal in het Nederlandse Helmond een eerste publieke demonstratie van het systeem gegeven worden.

In Nederland werd met het oog op betere doorstroming en daaraan gerelateerd verminderd verbruik en emissies, het project **Tovergroen** opgezet. Tovergroen is een systeem om vrachtwagens selectief te detecteren en indien mogelijk vervolgens prioriteit te verlenen door hun groenfase te verlengen. Het detectiesysteem functioneerde echter niet optimaal en vrachtwagens werden ofwel niet herkend of verkeerde voertuigen (auto met kampeerwagen, grote campers, ...) werden als vrachtwagens aangeduid. Ondanks deze problemen vergroot Tovergroen de doorrijkans voor vrachtwagens met 5 à 10%. Het aandeel van de vrachtwagens dat met de waargenomen snelheid kan doorrijden neemt met 5 à 10% toe. Tovergroen vermindert de roodlichtnegatie door zwaar verkeer. Het aantal forse roodlichtovertredingen door zwaar verkeer neemt met circa 30% af. Verwacht wordt dat het gunstige effect groter zal zijn bij een betrouwbaarder detectie.

Audi heeft in samenwerking met de Technical University of Munich, Inglostadt en GEVAS software **Travolution** ontwikkeld. De bedoeling is om de bestuurders te informeren over de juiste snelheid die ze moeten aanhouden om zonder stoppen kruispunten over te kunnen steken. Via communicatie (radiosignaal) kunnen de intelligente verkeerslichten melden hoe lang ze op rood staan en wordt dit doorgestuurd aan de ontvanger. In het voertuig wordt berekend met welke snelheid men moet rijden om het kruispunt bij groen te kunnen oversteken. In het testgebied -Inglostadt- werden 46 VRI's uitgerust met software om de communicatie met voertuigen mogelijk te maken. Twee testvoertuigen werden gebruikt. Dit systeem zal in een volgende fase uitgebreid worden met 20 auto's en 50 bijkomende VRI's. De bedoeling is om te onderzoeken hoe het optimaliseren van VRI's in steden de uitstoot en reistijd kon verminderen; tevens zou de stop-start van het verkeer kunnen verminderd worden.

Op het ITS World Congress in New York werden nog verschillende andere toepassingen gedemonstreerd waarbij informatie van verkeerslichten naar de voertuigen wordt gestuurd. Over deze gedemonstreerde toepassingen is veel minder informatie beschikbaar, maar een korte beschrijving is ter volledigheid opgenomen in dit steunpuntrapport.

English summary

Title ITS techniques for the improvement of traffic safety around intersections equipped with traffic lights.

Subtitle Study of the possibilities for dynamic speed advise from traffic control installations.

Abstract

This report proceeds on the report "ITS and traffic safety, Intelligent Transport Systems" (RA-MOW-2008-007) and expands on the possibilities of ITS systems for the enhancement of traffic safety around intersections equipped with traffic lights. It seems quite obvious that there is a higher risk for traffic accidents at junctions than on other road segments, since road users cross at junctions. Based on accident statistics, this report proves that enhancing safety around intersections indeed has a strong positive impact on the global traffic safety. It also introduces the use of Intelligent Transport Systems (ITS) as a mean to enhance safety around crossroads equipped with traffic lights. A detailed technical description is given of the communication techniques supporting such systems, and an extensive overview is given of the state-of-the-art in the most relevant related research projects.

Accident statistics prove that an important portion of both fatal and non-fatal accidents occur at intersections. In the EU-13 this represents 5.476 casualties or 21.3% of all traffic casualties. In Belgium 19.3% of all traffic casualties are the consequence of incidents at intersections. When the absolute figures are divided per million inhabitants, Belgium has the fifth highest number of deaths at intersections in Europe (after Italy, Hungary, Estonia and Poland). This Belgian number, 20 lethal accidents per million inhabitants, is higher than the average EU-13 (18.1) and EU-16 (19) numbers. In the Intersafe project (performed within the PReVENT project) several accident scenarios were studied, and among others the percentage of intersection fatalities within the total of traffic casualties were determined for France, Great-Brittan and Germany. Junctions are responsible for 30 to 60% of the incidents with wounded, and 16 to 36% of the fatal incidents.

When examining the analyses of red light negation, it can be concluded that the critical situation can be avoided if the driver is informed and warned earlier. However, it has to be guaranteed that this information and warnings do not lead to an even more dangerous risky behaviour where they are interpreted as "if I drive faster I will be able to just catch the green light". This would create an even higher risk of serious accidents, therefore enough attention should be given to this issue.

The above numbers and analyses prove that enhancing safety around intersections should be a priority in traffic policy. Extra attention should be given to preventing red light negation, since this is a major part of the dangerous traffic violations.

Research focusing on accidents on intersections proved that there is a **connection between the type of intersection and the degree of traffic safety** on that junction. A study was found that provides a quantitative evaluation of traffic safety around different types of intersections, expressed as the number of registered incidents with wounded per million passing vehicles. This number is the highest for intersections with traffic lights (0.11), followed by junctions on a main road (0.09), junctions with right of way (0.09), roundabouts (0.07) and junctions without right of way (0.06). The average number of wounded per accident decrease in the following order: traffic lights, main road, right of way, no right of way (respectively 1.22, 1.18, 1.11, 1.09). The seriousness of accidents, expressed as the number of hospitalizations rather increases in that order (respectively 17,16,18,18).

This means that rearranging intersections can be beneficial. An American study investigated what the effect would be if the junctions in North Virginia were rearranged. It was concluded that delays would be lowered with 62 to 74 % (according to junction type), meaning a reduction of 300.000 lost hours per year. The annual saving in fuel consumption would be 200.000 gallons (757.000 litres). Traffic safety would increase drastically: reforming junctions into roundabouts would result in 62 less accidents and 42 less wounded (comparison between 1993 en 2003 with five crossroads for which accident statistics were available).

Therefore a logical **measure** to enhance traffic safety is to rearrange intersections equipped with traffic lights or to transform them into roundabouts. Other possible measures can be related to traffic lights regulation, road layout (canalization, slopes, facilities for vulnerable road users, etc), improvement of visibility, driving education, speed management around intersections, enforcement (camera's), road surface, etc. These measures are already applied in Flanders today. But a technique that is almost entirely neglected is the employment of **Intelligent Transport Systems** to increase traffic safety around intersections. This approach is further elaborated in this report.

When traffic control infrastructure at crossroads is extended with intelligent software and possibly sensors and means to communicate with neighbouring vehicles, **applications** can be developed with a positive impact on different domains. The three most important ones are traffic safety, traffic circulation and the environment.

Many studies focusing on intelligent intersections aim to enhance traffic circulation. Self-organizing traffic lights divide traffic into platoons by counting (e.g. using counter loops in the road surface) the number of vehicles waiting at the traffic lights, and adjusting the switching times accordingly. This technique was applied in a traffic simulator to the Wetstraat in Brussels, where it would lower the total travel times approximately 25%. In other research a system was developed where every vehicle can vote for switching of the lights. For this it communicates it's identity, direction, position and place in the queue to the traffic light. Using this information of all the neighbouring vehicles, the light can calculate which light switch will result into the greatest total profit for all vehicles. Results showed an enhancement in average waiting times from 30 to 50%.

In the domain of positive effects on traffic safety, developments are taking place in a number of European research projects such as PReVENT, Safespot and VII. Frequent scenarios that are being tackled are avoiding of or warning for red light negation, avoiding accidents with vulnerable road users and coordination of turning left with oncoming traffic. Also, applications that aim for an enhancement in traffic circulation imply an enhancement in traffic safety.

Less research can be found aiming at environmental benefits, but again applications focusing on enhancement of traffic circulation imply positive effects on the environment.

A common aspect of many of these applications is the fact that they rely on **communication technology**. This can be divided into three major groups: local short-range communication, cellular data networks and digital broadcast technologies. When they are studied in the scope of intelligent intersection control, then both broadcast- and cellular technologies do not qualify as a possible supporting technology. This because of the one-way communication character of broadcasting, and the higher delays and end user cost of cellular data networks. This limits the choice to local communication media, more specific **CEN DSRC, IEEE 802.11p, CALM-M5, CALM-IR and IEEE 802.15.4**. When taking a closer look at their parameters, they indeed seem to be very suitable: they are interactive, free to use, can offer a high bandwidth and are not dependent of network operator coverage. An extensive technical description of these communication technologies is given in this report.

CEN DSRC is typically used for Electronic Toll Collect (such as Télépéage in France). However it is not suitable for the implementation of intelligent traffic lights because it only supports one-way communication. IEEE 802.11p is an amendment to the well-known IEEE 802.11 Wireless LAN technology (also known under the Wi-Fi hallmark) for use in vehicular environments. This technology is also not suitable for intelligent traffic lights in Flanders since it operates on the ITS frequency bands of the US. CALM-M5 however is the European derivate of IEEE 802.11p, and this technology indeed is greatly suitable. But just like IEEE 802.11p it will suffer van scalability issues, meaning that more research regarding scalable routing protocols has to be conducted before it can be used in a real rollout.

In the field of directional communication both European standards CALM-IR and CALM-MM qualify as an implementation candidate. CALM-IR is a communication standard based on infrared light, en is very good in sharply defining communication zones. CALM-MM operates on frequencies similar to radar, and can provide very high bandwidths. On short to medium term CALM-IR has the advantage that it is already much further developed then CALM-MM.

IEEE 802.15.4 is a communication technology used in wireless sensor networks. Its main characteristics are energy efficiency and scalability. This technology is most suited for application in mobile devices, thus for including vulnerable road users in the intelligent intersection. However this requires that the (typically SANET) routing protocols on top of this technology support mobility. This demands further research.

To conclude, on short to medium term three communication technologies qualify for the implementation of intelligent traffic lights: CALM-M5, CALM-IR and IEEE 802.15.4. CALM-M5 is suitable for omnidirectional communication with vehicles, CALM-IR for directional communication with vehicles and IEEE 802.15.4 for omnidirectional communication with vulnerable road users. Further research is needed regarding suitable routing protocols before CALM-M5 and IEEE 802.15.4 can be successfully applied in intelligent intersections.

Based on these technological developments, several **research projects** already investigate intelligent intersections.

INTERSAFE is a subproject of the PReVENT project. Goal is to inform and/or warn the driver about traffic lights; this information/warning contains information regarding the time and the proper speed to safely cross or exit the intersection. The idea is to avoid conflicts at junctions with these information/warnings. These conflicts can be caused by absent-mindedness (not noticing the traffic light or the state of the lights), by maladjusted driving behaviour in function of the expected red- or green cycle, or by an inadequate insight in the traffic lights installation. Finally, it is expected that this information/warning will stimulate the driver to adjust his driving behaviour, reducing the risk for conflicts. This adjustment of the driving behaviour mainly is related to a decrease in speed, this can be performed gradually, but can bend to severe braking if the information/warning is not taken into account on time.

Two demonstration vehicles were designed for testing this technique. A visual and auditive warning was used to give speed advice. Complying with this speed implies that the intersection can be safely crossed. Demonstrations at Versailles proved that this systems works well on the test roads from a technical point of view. However, the nature of the provided information and the voluntary character of the system imply that the safety on these intelligent intersections is highly dependent of they way the driver translates the information/warning into adjusted driving behaviour. From this research project, it appears that if some specific technical enhancements are conducted, supporting driving behaviour at intersections can improve traffic safety.

IRIS is a sub-project of the Safespot project. IRIS uses vehicle-infrastructure communication to analyze the movements of all individual vehicles, and laser scanners to

identify vulnerable road users. Based on these inputs, the system can assess dangerous situations on time and take necessary measures to avoid accidents (such as adjusting switching times of the lights or sending warning messages to human-machine interfaces in the vehicles using wireless communication). The IRIS system focuses on three scenarios responsible for a major part of the accidents at intersections: red light negation, turning left (conflict with oncoming traffic) and turning right (conflict with vulnerable road users).

In the project experiments are performed in a driving simulator. Simulation makes it possible to perform a more systematic and extensive analysis of the applications and their possible variations. Early during development simulation can be useful to study the timing of the applications, derive optimal parameter settings and assess the potential impact of the applications if validation in the real world is not possible. In parallel with the simulation work, a real IRIS system is built and tested in the project. In May 2009 a first public demonstration of this system will be given Helmond, The Netherlands.

Aiming to improve traffic circulation and to reduce consumption and emissions, the project **Tovergroen** was set up in The Netherlands. Tovergroen is a system to detect trucks and give them priority if possible by prolonging their green phase. However, the detection system performed inadequate, not recognizing trucks or recognizing the wrong vehicles as trucks (campers, cars with trailers, etc). Despite these problems Tovergroen increases the chance that trucks do not have to stop with 5 to 10%. Tovergroen decreases red light negation of heavy traffic with approximately 30%. It is expected that the positive effect will be even greater using a more reliable detection system.

In cooperation with the Technical University of Munich, Inglostadt en GEVAS software, Audi has developed **Travolution**. Aim is to inform drivers regarding the appropriate speed to maintain to cross the intersection without stopping. Using wireless communication, the intelligent traffic light sends the duration of the red light to the in-vehicle system. The in-vehicle system then calculates the appropriate speed to catch the green light and informs the driver. In Inglostadt 46 intersections were equipped with this system, and two test vehicles were used. In the next phase, this experiment will be extended with 20 cars and an additional 50 intersections. Goal is to investigate how the optimization of traffic light controllers in urban areas can decrease pollution and travel times.

At the ITS World congress in New York, several other applications were demonstrated where information is communicated from traffic lights to vehicles. Although there is almost no information available regarding these demonstrated applications, a short description is included in this report.

Inhoudsopgave

1.	PROBLEEMSTELLING.....	13
2.	ONGEVALSTATISTIEKEN KRUISPUNTEN	14
2.1	Europese Unie	14
2.2	Verenigde Staten van Amerika	19
2.3	Nederland	20
2.4	België	21
2.5	Besluit	22
3.	EFFECTEN VAN SOORT KRUISPUNT OP VERKEERSVEILIGHEID	23
4.	VEILIGHEIDSVERHOGENDE MAATREGELEN	26
5.	APPLICATIES GEBRUIK MAKENDE VAN INTELLIGENTE VERKEERSLICHTEN	27
6.	COMMUNICATIE ASPECTEN INTELLIGENTE VERKEERSLICHTEN.....	29
6.1	CEN DSRC	30
6.2	IEEE 802.11p	32
6.3	CALM-M5	34
6.4	CALM-IR	36
6.5	CALM-MM	41
6.6	IEEE 802.15.4	41
6.7	Besluit	43
7.	RESEARCH PROJECTEN INTELLIGENTE VERKEERSLICHTEN	45
7.1	Tovergroen	45
	7.1.1 Probleemstelling.....	45
	7.1.2 Beschrijving onderzoek Tovergroen.....	45
	7.1.3 Resultaten.....	47
	7.1.4 Conclusies.....	48
7.2	Travolution	49
7.3	INTERSAFE	53
	7.3.1 Situering.....	53
	7.3.2 Beschrijving	56
	7.3.3 Werking.....	57
	7.3.4 Architectuur	59
	7.3.5 Sensoren	59
	7.3.6 Human Machine Interface.....	61
	7.3.7 Marktintroductie.....	62
7.4	IRIS	63
	7.4.1 Situering.....	63
	7.4.2 Werking.....	64

	7.4.3	<i>Experimenten rijnsimulator</i>	66
7.5		Demonstraties gegeven op het 15e ITS World Congress	68
	7.5.1	<i>SafeTrip-21</i>	68
	7.5.2	<i>VII Test Beds</i>	70
	7.5.3	<i>Toyota demo</i>	72
8.		BESLUIT	75
9.		LITERATUURLIJST.....	77

1. PROBLEEMSTELLING

De kans dat op kruispunten meer verkeersongevallen plaatsvinden dan op andere wegsegmenten lijkt voor de hand te liggen. Verschillende weggebruikers kunnen elkaar kruisen. Om de kans op conflicten te beperken werd naast de voorrangregels, zebra's en het links afslaan via afzonderlijke verkeerslichten voorzien. Naarmate de verkeersintensiteit en de verschillende verkeersdeelnemers –verschil van snelheid en massa- toenemen, is echter de kans op het vermijden van conflicten minstens afhankelijk –voor kruispunten met VRI (verkeersregelinstallatie)- van het respecteren van de regels. Evident is dat de kans op conflicten toeneemt met het negeren van rood licht. Immers verkeerslichten wekken bij de groenfase minstens de verwachting op dat men veilig het kruispunt kan oversteken. De doorstroming wordt op een kruispunt met VRI mogelijk gemaakt door een tijdscheiding toe te passen: binnen de groene fase wordt een veilig oversteken mogelijk.

De veiligheid van dit oversteken is afhankelijk van het respecteren van het rode licht door het andere verkeer. Het is evident dat VRI met een groenfase voor links- en rechtssfeer, deze veiligheid voor rechtdoorgaand verkeer kunnen vergroten.

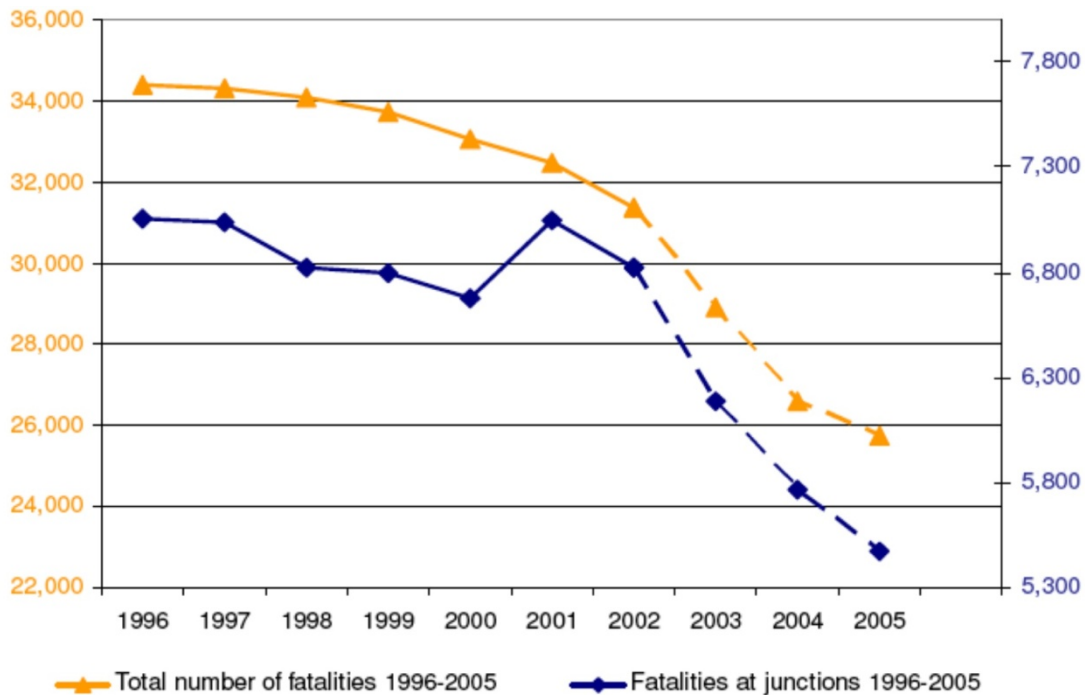
Dat de kans op letselongeval als gevolg van roodlicht negatie groter is dan bij andere types van ongevallen binnen bebouwde kom, lijkt minstens naar de ernst van het ongeval, bijna evident te zijn. Deze schijnbare evidentie –uit de aard van het ongeval (snelheid, zijdelingse botsingen, verschillende weggebruikers, gevoel dat men veilig het kruispunt overrijdt/oversteekt,...) wordt onder meer in het onderzoek van Redding et al. (1995) bevestigd. Het terugdringen van roodlicht negatie lijkt daarom een belangrijke maatregel om het aantal letselongevallen en de ernst van ongevallen te verminderen. Verschillende middelen kunnen daartoe aangewend worden: klassieke handhaving, roodlicht camera's, ITS-toepassingen, herinrichting kruispunt (bv. rotonde in plaats van VRI, kruising op verschillende niveaus, ...

Dit rapport zal inzicht geven over de mogelijkheden om via ITS de veiligheid op VRI-kruispunten te verhogen. Vooral de nadruk zal gelegd worden op het aanbieden van een veilige snelheid om de VRI te naderen, te stoppen of te passeren.

2. ONGEVALSTATISTIEKEN KRUISPUNTEN

2.1 Europese Unie

Kruispunten vormen een belangrijke bron van verkeersonveiligheid. In de 13 Europese landen vielen er tussen 1996 en 2005 meer dan 65.000 doden op kruispunten¹. De onderstaande Grafiek 1 geeft dit weer.



Source: CARE Database / EC
Date of query: December 2006

Grafiek 1: Evolutie van dodelijke ongevallen in EU-13, 1996-2005

Wanneer men dit uitzet per land is het cijfer voor België, Estland, Polen en Groot-Brittannië hoger dan het gemiddelde van EU-16.

Alhoewel hier alle soorten ongevallen op alle soorten kruispunten worden vermeld, geeft dit wel de grootorde van het veiligheidsprobleem weer. België staat met 20 ongevallen per miljoen inwoners ruim boven het Europese gemiddelde². In België is het aandeel van de doden op kruispunten 19,3 % van het totaal aantal verkeersdoden; daarbij was het aandeel van deze ongevallen (2005) in bebouwde kom, 76 en buiten bebouwde kom, 134. Bij dit kort overzicht wordt abstractie gemaakt van de kwaliteit van de statistische ongevaldata. Intussen werd op sommige drukke kruispunten in Vlaanderen geïnvesteerd in aparte groenfase voor linksaffers; soms is dit voor het volledige kruispunt maar in andere gevallen is dit beperkt tot één weg en wordt dit niet voorzien voor de andere weg op het kruispunt. Slechts erg beperkt is in Vlaanderen een aparte groentijd voor rechtdoorgaande fietsers/voetgangers en rechtsafslaand verkeer voorzien.

¹ Info: www.erso.eu

² Gemiddelde EU-13 was in 2005 18,1 en EU-16 19.

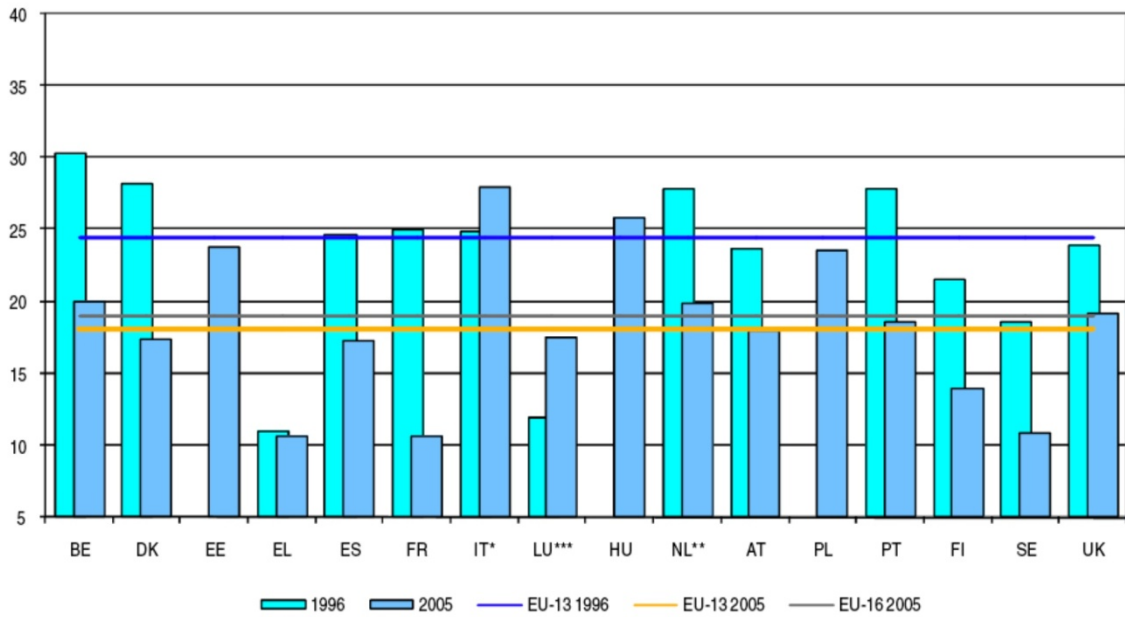
	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
BE	292	309	321	302	334	357	315	272	221	210
DK	176	149	163	155	150	122	130	128	122	94
EE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32
EL	123	118	133	162	141	148	168	139	122	118
ES	891	974	959	930	914	856	805	806	764	750
FR	1.529	1.496	1.519	1.444	1.375	1.364	1.238	971	822	664
IT*	1.511	1.413	1.329	1.354	1.416	1.896	1.921	1.699	1.641	1.641
LU***	7	5	5	2	11	8	8	8	8	8
HU	-	-	-	-	-	-	-	-	-	260
NL**	412	435	386	404	401	327	321	324	324	324
AT	164	189	149	189	153	146	167	161	145	148
PL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	898
PT	309	281	253	251	225	236	196	187	213	196
FI	99	111	106	91	85	104	93	83	65	73
SE	140	164	165	171	155	155	171	115	125	98
UK	1.402	1.396	1.333	1.340	1.318	1.325	1.287	1.289	1.189	1.152
EU-13	7.056	7.039	6.821	6.795	6.678	7.043	6.820	6.183	5.761	5.476
% yearly change	-	-0,2%	-3,1%	-0,4%	-1,7%	5,5%	-3,2%	-9,3%	-6,8%	-5,0%

- * Data from 2004
- ** Data from 2003
- *** Data from 2002

Source: CARE Database / EC
Date of query: December 2007

Tabel 1: Dodelijke ongevallen op kruispunten per land, 1996-2005




Wanneer dit uitgezet wordt per 1.000.000 inwoners dan heeft België het vijfde hoogst aantal doden op kruispunten; dit is na Italië, Hongarije, Estland en Polen. Wanneer men dit stelt tegen het gemiddelde van EU-13 en ook van EU-16 dan is het Belgische cijfer, 20 dodelijke ongevallen per 1.000.000 inwoners, hoger dan deze gemiddelden (respectievelijk 18,1 en 19 dodelijke ongevallen).



Source: CARE Database / EC
Date of query: December 2007

Grafiek 2: Dodelijke ongevallen op kruispunten '96-'04

In het Intersafe-project (binnen het PReVENT project) wordt voor drie landen (Frankrijk, Groot-Brittannië en Duitsland) het percentage van het aantal doden en gewonden op kruispunten aangeduid.

			
Number of all injury accidents	90.220	228.512	354.534
rate at intersections	30%	60%	42%
Number of all fatalities	6.058	3.581	6.613
rate at intersections	16%	36%	21%

Figuur 1: selectie uit ongevalstatistieken van drie Europese landen 2002/2003

Men kan vaststellen dat ongeveer 30 tot 60 % van alle ongevallen met gewonden op kruispunten vallen; voor dodelijke ongevallen is dit tussen de 16 à 36 %. Dit geeft aan dat de verkeersveiligheid op kruispunten bijzondere aandacht verdient. In dit Europees project wordt de typologie van de ongevallen voorgesteld in Tabel 2.

In deze indeling worden verschillende ongevalsscenario's geanalyseerd. Daarbij valt op dat het ongeval dat ontstaat wanneer twee voertuigen uit een verschillende richting komen en allebei rechtdoor rijden; het ene/het ander voertuig komt van rechts of links. Dit is voor Frankrijk en Duitsland verantwoordelijk voor meer dan 33 % van alle ongevallen met gewonden op kruispunten. Voor Duitsland is dit verantwoordelijk voor meer dan 28 % van de dodelijke ongevallen op kruispunten.

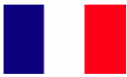

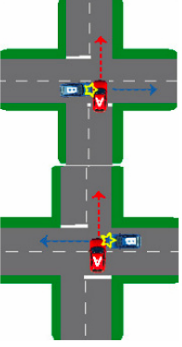
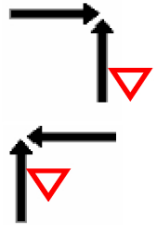
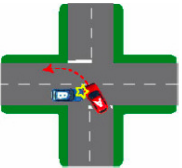


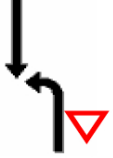


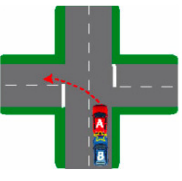

	general accident type	description		% of injury accidents		% of injury accidents	% of severe injuries + fatalities
a	turn into/straight crossing path	straight crossing path, opponent coming from the left or right		34%		33,3%	28,5%
b	turn into/straight crossing path	left turn into path, opponent coming from the left		10,5%		13,5%	12,5%
c	turn across path	left turn across path, oncoming opponent (opposite direction)		10%		18,7%	16,6%
d	turn into/straight crossing path	right turn into path, opponent coming from the left		2%		4,1%	2,8%
e	turn across path	left turn across path, preceding opponent (same direction)		2%		2,2%	3,3%
				58,5% of all intersection-related accidents = 15.636 accidents in France	71,8% of all intersection-related accidents = 106.260 accidents in Germany		

Table 2-2: Distribution of common accident scenarios 2002/2003.

Tabel 2: verdeling van de ongevaltypologieën

Drie scenario's kunnen hier (zie tabel 2) onderscheiden worden: links afslagbeweging en conflict met tegenliggend verkeer, oprijden van het kruispunt en conflict met de kruisende voertuigen en de VRI's (Verkeersregelininstallaties). Vermits dit thema het voorwerp is van dit rapport wordt dit scenario kort geanalyseerd in Tabel 3.

	kind of mistake			
	misinterpretation		sight obstruction	inattention
	31%		3%	30%
	avoidance manoeuvre			
	braking		steering	
	no attempt	unsuccessful attempt	no attempt	unsuccessful attempt
40%	59%	66%	30%	

Tabel 3: Fouten als gevolg van rood licht negatie

Uit deze tabel kan men opmaken dat een groot deel van de ongevallen die ontstaan als gevolg van rood licht negatie, een groot aandeel hebben in rempogingen voor het ongeval. Dit kan betekenen dat bestuurders te laat rood licht opmerken en door remmen proberen het ongeval te voorkomen. Indien de bestuurder vroeger kan geïnformeerd en gewaarschuwd worden dan kan de kritieke situatie worden voorkomen.

Bij deze analyse blijft uiteraard de opmerking overeind dat vroegtijdig informeren en waarschuwen voldoende is en dat hier geen actief ingrijpen noodzakelijk is. Dit betekent dat de informatie- of waarschuwingssystemen het niet mogen mogelijk maken dat deze informatie of waarschuwing niet leidt tot nog extra gevaarlijk risicogedrag. In wezen zou men via deze systemen informatie kunnen hebben dat een bepaalde snelheid niet leidt tot het veilig passeren van het kruispunt en zou dit kunnen geïnterpreteerd worden als "even extra gas bij" en men passeert tegen een hogere ongewenste snelheid het kruispunt wel. De kans op ongevallen met nog zwaardere gevolgen, wordt dan ook reëel.

2.2 Verenigde Staten van Amerika

In VSA sterven jaarlijks 800 mensen bij ongevallen bij kruispunten geregeld met verkeerslichten; het aantal gewonden bij dergelijke ongevallen wordt op 200.000 geschat. Voor de periode 1992-1998 waren dit 6.000 doden en 1.500.000 gewonden. De helft van deze doden waren voetgangers en inzittenden van de aangereden voertuigen (Insurance Institute for Highway Safety, 2001). In percentage uitgedrukt, hebben 23 % van alle ongevallen met doden plaats op kruispunten; 29 % daarvan vindt plaats op VRI's (Antonucci et al., 2004).

In detail bekeken, is dit op basis van de FARS data van 2002:

- 84 procent van de fatale ongevallen op kruispunten met verkeerslichten heeft plaats in stedelijk gebied, en
- 59 procent van de fatale ongevallen op kruispunten met verkeerslichten heeft te maken met hoekaanrijdingen met andere voertuigen

In een rapport van McCart (2005) wordt aangeduid wat de gevolgen zijn van rood licht rijden. Op vijf drukke locaties werd vastgesteld dat elke 20 minuten één bestuurder door het rode licht rijdt.

In bebouwde kom is rood licht rijden verantwoordelijk voor 22 % van alle ongevallen, terwijl dit voor ongevallen met gewonden oploopt tot 27 %:

The deliberate running of red lights is a common — and a serious — violation. A study conducted at five busy intersections in Fairfax, Virginia, indicates that motorists frequently run red lights. On average, a motorist ran a red light every 20 minutes. 1 During peak travel times, red light running was more frequent.

Such violations may seem trivial to the violators, but the safety consequences are real. An Institute study found that, compared with all other types of urban crashes, those involving signal violations are the most likely to cause injuries.

Researchers reviewed police reports of crashes in four urban areas during 1990-91, finding that running red lights and other traffic controls is the most common cause of all urban crashes (22 percent) and the leading cause of injury crashes in urban areas (27 percent). On a national basis, Institute research found that drivers who ran red lights were responsible for almost 200,000 crashes in 2004, which resulted in nearly 170,000 injuries and 928 deaths.

In het rapport 'Fatality Analysis Reporting System, U.S. Departement of Transportation' geciteerd in een bericht van Insurance Institute For Highway Safety (IIFHS, 2000) wordt per staat aangeduid hoeveel doden (absoluut en per 100.000 inwoners) er zijn als gevolg van rood licht rijden. Opvallend zijn ook de hoge cijfers voor sommige steden.

Tevens valt op dat van de 6.000 doden -periode 1992-1998- meer dan de helft van de slachtoffers voetgangers en inzittenden van voertuigen die aangereiden werden door rood licht rijders; het aantal gewonden in dergelijke ongevallen bedroeg voor dezelfde periode 1.500.000.

STATES
WITH HIGHEST DEATH RATES IN RED LIGHT RUNNING
CRASHES PER 100,000 PEOPLE, 1992-98

	Population	Deaths	Rate per 100,000
Arizona	4,280,998	305	7.1
Nevada	1,529,841	59	3.9
Michigan	9,655,540	355	3.7
Texas	18,677,046	663	3.5
Alabama	4,255,686	143	3.4
New Mexico	1,670,580	56	3.4
Florida	14,197,723	434	3.1
California	31,645,023	956	3.0
Delaware	717,499	21	2.9

CITIES
WITH HIGHEST DEATH RATES IN RED LIGHT RUNNING
CRASHES PER 100,000 PEOPLE, 1992-98

	Population	Deaths	Rate per 100,000
Phoenix, AZ	1,125,599	122	10.8
Memphis, TN	614,067	49	8.0
Mesa, AZ	333,756	26	7.8
Tucson, AZ	445,840	34	7.6
St. Petersburg, FL	237,480	18	7.6
Birmingham, AL	256,386	18	7.0
Dallas, TX	1,047,816	73	7.0
Albuquerque, NM	412,625	28	6.8
Louisville, KY	260,572	17	6.5
Detroit, MI	998,523	65	6.5

Note: cities with population more than 200,000

2.3 Nederland

In Nederland werden in 2005 door het Centraal Justitieel Incasso Bureau in totaal 401.421 overtredingen geteld waarbij bestuurders door rood licht reden. In 2006 waren dit er 362.223. Een afname van 9,8% ten opzichte van 2005.³

In het SWOV-rapport van Hway-Liem (1997) wordt gerapporteerd over een proefhandhaving met betrekking tot snelheid en roodlicht negatie. In dit rapport wordt voorgesteld om een specifieke vorm van handhaving te ontwikkelen. Interessant voor dit onderzoek zijn de cijfers over de overtredingen voor deze locaties.

³ Bron: www.verkeershandhaving.nl

Door de Verkeerspolitie/Dienst Ruimtelijke Ordening van de gemeente Amsterdam werden praktische criteria gehanteerd bij de selectie van de kruispunten en rijrichtingen: het aantal ongevallen c.q. roodlicht-ongevallen (1990-1993) en roodlicht-overtredingen geschouwd gedurende één uur.

Onderstaande figuur geeft per kruispunt (vier locaties) weer:

- kolom 2: het aantal roodlichtovertredingen per uur;
- kolom 3: het totaal aantal ongevallen op het hele kruispunt in 1990-1993;
- kolom 4: het aantal letselongevallen op het hele kruispunt;
- kolom 5: het aantal ongevallen en letselongevallen vanwege door rood licht rijden op het hele kruispunt;
- kolom 6: het aantal ongevallen en letselongevallen op de geselecteerde rijrichting als gevolg van door rood licht rijden

(bron: Verkeerspolitie, Dienst Ruimtelijke Ordening).

1	2	3	4	5		6	
Krpt. no.	RL overtr/uur	Hele krpt.	Hele krpt.	Hele krpt.		1 richting	
		Alle ong.	Lets.ong.	RL-ong.	Lets-ong.	RL-ong.	Lets-ong.
I	40	54	16	6	3	3	2
II	25	92	28	18	11	4	3
III	25	97	25	29	13	15	4
IV	-	32	10	10	5	6	4
Totaal	90	275	79	63	32	28	13

Op basis van dit onderzoek wordt vastgesteld dat 23 % van alle ongevallen op kruispunten gerelateerd zijn aan rood licht rijden. Bij letselongevallen is dit 41 %. Hierbij kan aangeduid worden dat het wegwerken van rood licht rijden, de verkeersveiligheid sterk kan verhogen.

2.4 België

Op de Brusselse Staten-Generaal van de verkeersveiligheid (2003) werd rijden door rood licht als een belangrijke oorzaak van ongevallen aangeduid:

Rijden door rood licht is een belangrijke oorzaak van ongevallen, voornamelijk in een stedelijke omgeving waar er veel meer kruispunten zijn. Het negeren van het rood licht is goed voor 6% van het aantal ongevallen in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest (161 ongevallen op 2.707 in 2000), tegen "slechts" 2% voor heel België. Zowat 10% van de ongevallen met doden of zwaargewonden in het Brussels Gewest is te wijten aan het negeren van het rood licht door een weggebruiker (18 ongevallen op 210 in 2000 – bron : NIS-BIVV). In de meeste gevallen (15 gevallen op 18 in 2000) is de overtreder een bestuurder van een particulier voertuig. De bestrijding van het negeren van het rood licht moet dus beschouwd worden als een prioriteit in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest. Hiertoe dienen controle-sanctie en sensibilisering gecombineerd te worden.

Ongevallen met voetgangers, waarbij meestal (in 60 à 70 % van de gevallen) een rechtdoorrijdend voertuig is betrokken, maar die zich ook vaak voordoen met een links afslaand voertuig (CETUR-SETRA, 1992). Ter herinnering: in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest worden er tal van voetgangers aangereden op kruispunten met verkeerslichten: 14% van de verongelukte voetgangers wordt aangereden op

een kruispunt met verkeerslichten (474 op de 3.474 voetgangers, gecumuleerde cijfers voor 1991-1996, BIVV 1999).

2.5 Besluit

Deze cijfers tonen aan dat het beveiligen van kruispunten –VRI's of gewone kruispunten– een prioriteit in het verkeersveiligheidsbeleid zou moeten zijn. Het beveiligen van VRI's is daarbij belangrijk vooral indien men weet dat het rood licht rijden een belangrijk onderdeel is van gevaarlijke overtredingen. Vermits dit rood licht rijden gecombineerd wordt met niet aangepaste snelheid, leidt dit bij een conflict tot ongevallen met doden en zwaargewonden.

3. EFFECTEN VAN SOORT KRUISPUNT OP VERKEERSVEILIGHEID

Bij kruispunten is de kans op een conflict of ongeval afhankelijk van de aard van het kruispunt.

Uit een onderzoek van de SWOV (Janssen, 2004) waarbij gegevens van 500 kruisingen (binnen bebouwde kom) werden gebruikt, werden de geregistreeerde ongevallen in de periode 1994 tot en met 1998 bestudeerd. Deze studie geeft een kwantitatieve beoordeling van de veiligheid van een aantal kruisingstypen, uitgedrukt in het aantal geregistreeerde letselongevallen per miljoen gepasseerde motorvoertuigen.

De bedoeling was om de verschillen in veiligheid tussen de onderscheiden kruispunten vast te stellen en de risicomaat ervan te bepalen.

Uit de analyse blijkt dat het gemiddelde aantal slachtoffers per letselongeval afneemt in de volgende volgorde: verkeerslichten, voorrangsweg, voorrangskruising en geen voorrangskruising (respectievelijk: 1,22 / 1,18 / 1,11 / 1,09. De ernst uitgedrukt in aantal ziekenhuisgewonden neemt in die volgorde eerder toe dan af (respectievelijk 17, 16, 18, 18).

Wanneer men de kruisingen met verschillende voorangsregelingen⁴ vergelijkt, zijn de risicowaarden voor de kruispunten met verschillende voorangsregeling:

- 144 kruispunten met verkeerslichten (lo/vp=0,11);
- 134 kruispunten op voorrangsweg (lo/vp=0,09);
- 73 kruispunten met voorrangskruising (lo/vp=0,09);
- 63 kruispunten zonder voorangsregeling (lo/vp=0,06).

Bij rotondes is het risico 0,07 letselongevallen per miljoen gepasseerde motorvoertuigen voor zowel de 26 rotondes met fietsers in de voorrang, als voor de 15 rotondes met fietsers uit de voorrang. Beide typen rotondes hebben vrijwel dezelfde gemiddelde intensiteiten, zowel voor het snelverkeer (12.400 / 12.100) als voor het langzaam verkeer (2.600 / 2.600).

De kruisingstypen zijn steeds twee aan twee vergeleken op de risicowaarde.

Binnen de vele analyses en vergelijkingen is het nuttig om de vergelijking tussen het risico op kruispunten met verkeerslichten en andere kruispunten te vermelden. Het risico op kruispunten met verkeerslichten is:

- 19% hoger dan op kruispunten op voorrangsweg;
- 21% hoger dan op kruispunten met voorrangskruising;
- 81% hoger dan op kruispunten zonder voorangsregeling;
- 49% hoger dan op rotondes met fietsers in de voorrang;
- 55% hoger dan op rotondes met fietsers uit de voorrang;
- 30% hoger dan op de kruisingen zonder verkeerslichten, incl. rotondes;
- 26% hoger dan op kruispunten zonder verkeerslichten, excl. rotondes;
- 51% hoger dan op rotondes.

Naast de kenmerken van de kruisingstypen, hangen ook hun risicowaarden samen met de intensiteit van het snelverkeer. Het is op deze wijze dat men de verschillende soorten

⁴ Hier is bovendien onderscheid gemaakt tussen kruispunten en rotondes omdat de voorangsregelingen van deze typen wezenlijk verschillen.

kruispunten met elkaar kan vergelijken; daarbij moet dit gebeuren binnen specifieke intensiteitbereiken. Volgende eindconclusies kunnen –voor Nederland- worden getrokken:

- Van alle kruisingstypen hebben drietakskruispunten met de regel rechts voorrang - en een gemiddelde intensiteit van minder dan 5.000 motorvoertuigen per dag - gemiddeld het laagste risico (0,03 letselongevallen per miljoen gepasseerde motorvoertuigen).
- Drietakskruispunten met verkeerslichten en een gemiddelde intensiteit van meer dan 20.000 motorvoertuigen, scoren op de tweede plaats (risicowaarde: 0,06).
- Drietakskruispunten met andere voorrangsregelingen of verkeerslichten en een gemiddelde intensiteit tussen de 5.000 en 20.000 motorvoertuigen, hebben hogere risicowaarden (0,08-0,13). Van alle viertakskruisingen met een gemiddelde intensiteit tussen de 5.000 en 20.000 motorvoertuigen per dag, hebben rotondes de laagste risicowaarde (0,07) en viertakskruispunten met verkeerslichten de hoogste (0,18).
- Viertakskruisingen met een gemiddelde intensiteit boven de 20.000 motorvoertuigen komen praktisch alleen voor met verkeerslichten; zij hebben een risicowaarde van 0,13.

intensiteitsklasse	aantal	intensiteit	risico (lo/vp)	verkeers-prestatie (vp)	geregistreerd aantal letsel-ongevallen (lo)	verwacht aantal letsel-ongevallen	chi-kwadraat	aantal vrijheids-graden	chi-kwadraat bij P=0,10	significant	verschil
intensiteitsklasse 1	12	9.724	0,13	213	27	15	10,08				
intensiteitsklasse 2	11	16.227	0,06	326	19	23	0,58				
intensiteitsklasse 3	12	27.344	0,06	599	33	42	1,77				
som	35	17.809	0,07	1.138	79	79	12,44	2	4,61	ja	
intensiteitsklasse 1	12	9.724	0,13	213	27	18	4,28				
intensiteitsklasse 2	11	16.227	0,06	326	19	28	2,79				
som	23	12.975	0,09	539	46	46	7,07	1	2,71	ja	117%
intensiteitsklasse 1	12	9.724	0,13	213	27	16	8,06				
intensiteitsklasse 3	12	27.344	0,06	599	33	44	2,86				
som	24	18.534	0,07	812	60	60	10,92	1	2,71	ja	130%
intensiteitsklasse 2	11	16.227	0,06	326	19	18	0,03				
intensiteitsklasse 3	12	27.344	0,06	599	33	34	0,01				
som	23	21.786	0,06	925	52	52	0,04	1	2,71	nee	
intensiteitsklasse 1	12	9.724	0,13	213	27	15	10,08				
intensiteitsklasse 2+3	23	21.786	0,06	925	52	64	2,32				
som	35	17.809	0,07	1.138	79	79	12,41	1	2,71	ja	125%
intensiteitsklasse 2	11	16.227	0,06	326	19	23	0,58				
intensiteitsklasse 1+3	24	18.534	0,07	812	60	56	0,23				
som	35	17.809	0,07	1.138	79	79	0,81	1	2,71	nee	
intensiteitsklasse 3	12	27.344	0,06	599	33	42	1,77				
intensiteitsklasse 1+2	23	12.975	0,09	539	46	37	1,97				
som	35	17.809	0,07	1.138	79	79	3,74	1	2,71	ja	-35%
conclusies:											
Het risico in intensiteitsklasse 1 is 117% hoger dan in intensiteitsklasse 2											
Het risico in intensiteitsklasse 1 is 130% hoger dan in intensiteitsklasse 3											
Het risico in intensiteitsklasse 1 is 125% hoger dan in intensiteitsklassen 2+3											
Het risico in intensiteitsklasse 3 is 35% lager dan in intensiteitsklassen 1+2											

Tabel 4: Vergelijking van kruispunten met verschillende voorrangsregeling; kruispunten met verkeerslichten (Janssen, 2004)

Uit de vergelijking van de verschillende kruispunten blijkt dat zowel de drie- als de viertakskruispunten met verkeerslichten in laagste intensiteitsklassen, een significante hogere risicowaarde hebben dan in de hogere klassen:

- Het risico in intensiteitsklasse 1 is 117 % hoger dan in intensiteitsklasse 2.
- Het risico in intensiteitsklasse 1 is 130 % hoger dan in intensiteitsklasse 3.
- Het risico in intensiteitsklasse 3 is 117 % hoger dan in intensiteitsklasse 2.

Bij de interpretatie van deze conclusies moet men voor ogen houden dat het hier enkel kruispunten met een snelheidsregime van 30, 50 en 70 km/uur⁵ betreffen en ze gelegen zijn binnen de bebouwde kom. Vermits het grootste aantal onderzochte kruispunten, kruispunten met een snelheidsregime van 50 km/uur zijn, betekent dit zowel de menging van verschillende verkeersdeelnemers als het trage verkeer belangrijk is. Tevens is dit een vergelijkend onderzoek en niet een studie van de effecten van maatregelen in voor- en nametingen.

Hoewel de verschillen in risicowaarden van kruisingstypen niet mogen uitgelegd worden als het effect van kenmerken waarin deze typen van elkaar verschillen, kan hier wel worden aangeduid dat de aandacht voor de veiligheid voor de weggebruikers voor elk type specifiek moet worden ingevuld. Dit is immers geen voor- en nastudie waarin de effecten van maatregelen worden onderzocht, maar puur een vergelijkend onderzoek. Dit betekent dat men elk type kruispunt moet onderzoeken op de aandacht voor de verkeersveiligheidsaspecten waarbij elk type kruispunt –mits voldoende aandacht voor specifieke onveiligheidssituaties en doorstromingsfuncties- an sich voldoende waardevol kan zijn.

Bij het herinrichten van kruispunten in kruispunten met verkeerslichten of de aanleg van het kruispunt in een rond punt, kan er zowel een effect zijn naar de verkeersveiligheid, de doorstroming als verbruik/emissies. Als illustratie hiervan kan verwezen worden naar het onderzoek van de effecten van het herinrichten van kruispunten in Noord Virginia (Bergh et al., 2005). Volgens deze studie (jaargemiddelde dagelijks aantal voertuigen 277.050) zouden de vertragingen met 62-74 % (naargelang het soort kruispunt) verminderd zijn; dit zijn 300.000 verliesuren op jaarbasis minder. Het jaarlijks minderverbruik zou 200.000 Gallons (757.082 liter) bedragen. De verkeersveiligheid zou drastisch verhogen: het herinrichten van het kruispunt in rotondes zou 62 ongevallen en 41 gewonden minder veroorzaken (vergelijking tussen 1993 en 2003 met vijf kruispunten waarvoor ongevaldata beschikbaar was).

⁵ Het risico op kruispunten met 50 km/uur is 111% hoger dan op kruispunten met 70 km/uur

4. VEILIGHEIDSVERHOGENDE MAATREGELEN

Bij de analyse van de verkeersveiligheid op kruispunten kunnen verschillende elementen worden afgetoetst: veiligheidseisen en vaste tijdsinstellingen, intensiteiten van de toeleidende verkeersstromen, de afrijcapaciteit, kruispuntanalyse, typen verkeerslichtenregelingen en de toepassing hiervan, starre regelingen, detectoren, voertuigafhankelijke regelingen, speciale regelingen voor doelgroepen (openbaar vervoer, fietsers en voetgangers), gecoördineerde regelingen, verkeersafhankelijke (netwerk)regelingen, evalueren van een verkeerslichtenregeling

Vertrekkende van deze elementen kan de verkeersveiligheid op kruispunten verhoogd worden via verschillende maatregelen. Deze maatregelen kunnen betrekking hebben op de verkeerslichtenregeling, weginrichting (kanalisatie, afslagstroken, fiets- en voetgangersvoorzieningen, versmallingen, ...), verbetering zichtbaarheid, rijopleiding en educatie, snelheidsmanagement in de omgeving van het kruispunt, handhaving (camera's), wegdekbedekking, ...

Nieuwe technieken –ITS-technieken- worden erg beperkt onderzocht terwijl kan verwacht worden dat het overbrengen van informatie over de infrastructuur naar het voertuig, mogelijkheden kan bieden om bepaalde conflicten op kruispunten te voorkomen.

In dit rapport ⁶ wordt de mogelijkheid onderzocht om informatie van de verkeerslichtenregeling tijdig naar het voertuig te brengen. Op deze wijze kan een aangepaste naderingssnelheid worden geadviseerd, ondersteund of opgelegd.

Vermits in verschillende Europese onderzoeken en bij verschillende autoconstructeurs deze techniek in één of andere vorm werd uitgetest en/of beschikbaar is, kan over deze technieken gerapporteerd worden. In de volgende sectie zal in meer detail worden besproken welke applicaties mogelijk worden dankzij intelligente verkeerslichten. Daarna zal dieper worden ingegaan op de communicatie aspecten van deze nieuwe technieken, en tenslotte zal een uitgebreide bespreking gegeven worden van bestaande onderzoeksprojecten betreffende intelligente verkeerslichten.

⁶ In de fiche werd vermeld dat indien dit binnen het programma haalbaar is en bijkomende financiële ondersteuning voor het testen kan gevonden worden, zullen testen met een (ISA-)voertuig worden uitgevoerd. Deze testen kunnen dan een algemeen beeld geven over de technische haalbaarheid.

Het vinden van extra middelen voor het testen van deze techniek met een ISA-voertuig bleek niet mogelijk. De bedoeling was om in het IBBT NextGenITS project bij de coöperatieve systemen om deze techniek op punt te stellen en testen. In de finale fase werd dit niet binnen dit onderzoeksprogramma weerhouden waardoor deze testen niet konden uitgevoerd worden

5. APPLICATIES GEBRUIK MAKENDE VAN INTELLIGENTE VERKEERSLICHTEN

Wanneer verkeersregelininstallaties op kruispunten voorzien worden van intelligente softwaretoepassingen en eventueel sensoren of draadloze communicatie met voertuigen in de onmiddellijke omgeving, dan kunnen op verschillende domeinen grote vooruitgangen worden geboekt. De drie grootste van deze domeinen zijn verkeersveiligheid, doorstroming en het milieu.

Veel onderzoek met betrekking tot intelligente kruispunten richt zich tot een **beter doorstroming** van het verkeer. Hierbij worden technieken bekeken die wel of niet gebruik maken van communicatie met de voertuigen. In het doctoraatsproefschrift van Gershenson (2007) over zelforganiserende systemen is een hoofdstuk gewijd aan zelforganiserende verkeerslichten. Deze lichten maken geen gebruik van communicatie met de voertuigen of met andere verkeerslichten. Basisidee is dat een verkeerslicht telt (bv gebruik makende van tellussen in het asfalt) hoeveel voertuigen wachten voor het rode licht, en hen pas groen licht geeft als er voldoende voertuigen aan het wachten zijn. Hierdoor ontstaan er "platoons" of groepen voertuigen die zich in blok verplaatsen, wat tot een efficiëntere doorstroming leidt. Er wordt wel met een aantal extra randvoorwaarden rekening zoals een minimum roodtijd om te snel schakelen van de lichten te vermijden, en het wachten met schakelen als de staart van een platoon nog door het groene licht aan het rijden is. Deze regeltechniek werd in een microscopische verkeerssimulator getest, eerst in abstracte scenario's, en later werd een simulatie van de Wetstraat in Brussel uitgevoerd, gebaseerd op echte meetgegevens verkregen van het ministerie Mobiliteit en Openbare werken. Er werd besloten dat indien de toenmalige verkeersregeling op de Wetstraat zou vervangen worden door het voorgestelde algoritme, de gemiddelde totale reistijden met ongeveer 25% zouden zakken.

Schmocker et al. (2007) ontwikkelden een intelligente verkeersregelininstallatie zonder communicatie gebaseerd op vage logica. Deze oplossing werd ook microscopisch gesimuleerd in een bestaande case studie, het drukke Marylebone Road – Baker Street kruispunt in Londen. Resultaat hiervan was dat de voorgestelde technieken makkelijk kunnen gebruikt worden om de objectieven van de signalisatie aan te passen. Er werd echter wel opgemerkt dat het moeilijk is om voetgangers een hogere prioriteit en dus kortere wachttijden te geven zonder de wachttijden van de voertuigen te verhogen. De keuze van objectief van een verkeersregelininstallatie moet dus voornamelijk politiek bepaald worden.

Naast deze publicaties zijn er ook verschillende onderzoeken te vinden die intelligente verkeersregelininstallaties ontwerpen die wel gebruik maken van draadloze communicatie met de voertuigen en/of naburige verkeerslichten. Wiering et al. (2004) ontwikkelden een systeem waarbij elke voertuig een stem kan uitbrengen voor het groen schakelen van het verkeerslicht, waarbij hij zijn identificatie, richting aan het verkeerslicht, positie in de wachtrij en bestemmingsadres aan het verkeerslicht laat weten. Gebruik makende van deze informatie van alle voertuigen rond het verkeerslicht kan het verkeerslicht berekenen welke schakeling de grootste opgetelde winst voor de voertuigen oplevert. Verschillende varianten op dit basisidee werden in de studie onderzocht. Resultaten toonden een verbetering in de gemiddelde wachttijden voor de voertuigen van 30 tot 50%. In Steingrover et al. (2005) werd deze techniek verder verfijnd door ook gebruik te maken van congestie-informatie over de naburige verkeerslichten, en in Isa et al. (2006) werd de techniek uitgebreid met ondersteuning voor het opvangen van blokkades te wijten aan ongevallen. In Gradinescu et al. (2007) werd ook onderzoek verricht naar adaptieve verkeerslichten, maar in tegenstelling met de vorige publicaties waar de communicatie simpel werd gemodelleerd, werd niet alleen de applicatie, maar ook de draadloze communicatie zelf gesimuleerd.

Op het gebied van **positieve effecten op de verkeersveiligheid** worden er ook een aantal specifieke onderzoeken verricht. Voorbeelden hiervan zijn onder andere te vinden in de projecten PReVENT, SAFESPOT, Travolution en VII (zie sectie 7.). Veelvoorkomende scenario's die hierbij worden aangepakt zijn het vermijden van of verwittigen voor roodrijden, vermijden van ongevallen met zwakke weggebruikers (zie ook Sugimoto et al. (2008)) en het coördineren van linksaf draaien bij aankomend verkeer. Tevens kan ook opgemerkt worden dat de applicaties die mikken op een betere doorstroming op zich tevens een verbetering van de verkeersveiligheid met zich mee brengen, aangezien er bij een betere doorstroming minder gevaarlijke situaties ontstaan bij het naderen van een wachtende rij voertuigen.

Met betrekking tot **positieve effecten op het milieu** is er minder specifiek onderzoek te vinden, maar opnieuw hebben de applicaties met een betere doorstroming ook positieve milieueffecten, aangezien de rijtijden korter worden en er minder moet gestopt en vertrokken worden. Ook zou men op intelligente verkeerslichten de lichtcyclussen naar de voertuigen kunnen communiceren, waarop deze zouden kunnen anticiperen op het rode licht en hun motor reeds kunnen uitschakelen. Momenteel zijn er reeds wagens op de markt die tijdens stilstand de motor uitschakelen om brandstof te sparen, maar deze systemen treden pas in werking wanneer het voeruit effectief stilstaat. Intelligente verkeerslichten maken het dus mogelijk om deze bestaande techniek efficiënter toe te passen en dus een grotere impact op het milieu te hebben.

6. COMMUNICATIE ASPECTEN INTELLIGENTE VERKEERSLICHTEN

In een vorig steunpuntrapport, "Intelligente Transport Systemen – ITS en verkeersveiligheid" (De Mol et al., 2008) werd een algemeen state-of-the-art overzicht gegeven van ITS vanuit verschillende invalshoeken. Een belangrijk onderdeel hiervan was het overzicht van de mobiele communicatie technologieën die in aanmerking komen voor de implementatie van ITS systemen. Er werd een onderscheid gemaakt in drie grote groepen: lokale communicatie op korte afstand zoals IEEE 802.11p, cellulaire datanetwerken zoals GPRS, UMTS en WiMAX, en digitale broadcasttechnologieën zoals RDS, DAB of DVB-H. In Tabel 5 worden de belangrijkste eigenschappen van deze technologieën samengevat.

Naam	Type	Bandbreedte	Prijs gebruik	interactief	Dekking (in België)
CEN DSRC	lokaal	500 Kbps – 1 Mbps	gratis	ja	nvt
IEEE 802.11p	lokaal	27 Mbps	gratis	ja	nvt
CALM-M5	lokaal	27 Mbps	gratis	ja	nvt
CALM-IR	lokaal	128 Mbps	gratis	ja	nvt
CALM-MM	lokaal	+200 Mbps	gratis	ja	nvt
IEEE 802.15.4	lokaal	250 Kbps	gratis	ja	nvt
GSM/GPRS	cellulair	114 Kbps	betalend	ja	zeer goed
EDGE	cellulair	180 Kbps	betalend	ja	zeer goed
UMTS	cellulair	384 Kbps	betalend	ja	goed
HSPA	cellulair	3.6 Mbps	betalend	ja	goed
LTE	cellulair	+100 Mbps	betalend	ja	geen
WiMAX	cellulair	25 Mbps	Betalend	ja	zeer beperkt
RDS	broadcast	1.1 Kbps	gratis	nee	zeer goed
Darc/Swift	broadcast	16 Kbps	gratis	nee	zeer goed
DAB	broadcast	100 Kbps data	gratis	nee	zeer goed
DVB-T	broadcast	+1 Mbps data	gratis	nee	Goed
DVB-H	broadcast	+0.5 Mbps data	gratis	nee	geen

Tabel 5: overzicht communicatie technologieën

Wanneer we nu willen bepalen welke technologieën in aanmerking komen voor de implementatie van intelligente verkeerslichten, kunnen we al direct alle systemen die niet interactief zijn weglaten. Het is namelijk noodzakelijk dat communicatie mogelijk is zowel

van het voertuig naar het verkeerslicht, als omgekeerd. Daarom komen de digitale broadcast technieken niet in aanmerking.

Enkel de lokale en cellulaire technieken blijven over. Cellulaire systemen kennen twee nadelen t.o.v. lokale: ze zijn niet gratis in gebruik (abonnementskosten operator, terwijl lokale systemen in vrije frequentie banden werken), en ze kennen een grotere end-to-end delay. Dit laatste werd duidelijk in het onderzoek van Lan et al. (2007), waar bleek dat het gebruik van publieke cellulaire datanetwerken grote delay variaties en fouten kan kennen. In dit onderzoek werd besloten dat zulke netwerken niet geschikt zijn voor het opereren van gekoppelde intelligente verkeerslichten.

De kostprijs voor de gebruiker en problemen met end-to-end delay zorgen ervoor dat cellulaire datanetwerken ook niet in aanmerking komen voor intelligente verkeerslichten. Dan blijven alleen de lokale communicatie media nog over. Wanneer we de parameters uit Tabel 5 erop na slaan, blijken deze inderdaad zeer geschikt te zijn: ze zijn interactief, gratis in gebruik, kennen een hoge beschikbare bandbreedte en zijn niet afhankelijk van de dekking voorzien door een netwerkoperator. In de volgende secties zal een gedetailleerde beschrijving worden gegeven van deze lokale communicatie middelen. Een besluit van dit onderdeel vindt men in sectie 6.7 .

6.1 CEN DSRC

DSRC is een afkorting van Dedicated Short Range Communication, een term die soms leidt tot verwarring. In de literatuur wordt deze term namelijk zowel gebruikt als beschrijving van elke technologie ontwikkeld voor lokale voertuig-voertuig en voertuig-infrastructuur communicatie, als voor het beschrijven van een specifieke RFID-gerelateerde (Radio Frequency Identification) standaard die gebruikt wordt voor voertuig-infrastructuur communicatie.

In deze paragraaf beschouwen we DSRC als de standaard vastgelegd door het European Committee for standardization (CEN), dus de RFID-gerelateerde interpretatie van DSRC. Deze technologie wordt veel gebruikt in Europese Electronic Toll Collect (ETC) systemen, bv Télépéage in Frankrijk.

In 1992 werd door het CEPT (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations) en het ERC (European Radio communications Committee) de ERC Decision (92)02 bekrachtigd welke specifieke frequentiebanden vastlegt voor het ontwikkelen van een volledig geïntegreerd wegtransport systeem. Hoofddoel van deze beslissing was het verbeteren van alle aspecten van wegtransport. Op Europees niveau werd de frequentie band 5 795 – 5805 MHz vastgelegd, met de mogelijkheid om een bijkomende sub-band 5805-5815 MHz vast te leggen op nationale niveau. Deze banden waren voorzien voor initiële infrastructuur-voertuig communicatiesystemen, in het bijzonder voor tolsystemen waarvoor in die tijd in een aantal Europese landen vraag naar was. In 2002 werd de ERC Decision (92)02 door het Electronic Communications Committee (ECC) teruggetrokken en vervangen door ECC Decision (02)01, die van kracht ging op 15 maart 2002 (International Telecommunication Union, 2006)

Gebaseerd op deze ECC Decision werden standaarden voor DSRC in het kader van ITS toepassingen ontwikkeld door het European Committee for Standardization (CEN) en het European Telecommunications Standards Institute (ETSI). CEN EN 12253 is een standaard voor de fysische laag gebruik makende van microgolven op 5.8 GHz en beschrijft radiocommunicatie en RF parameter waarden die noodzakelijk zijn voor het naast elkaar bestaan en interoperabiliteit van DSRC systemen. Deze standaard maakt deel uit van een hele familie van in totaal 4 DSRC standaarden die handelen over de lagen 1,2 en 7 van de Open Systems Interconnection (OSI) protocol stack en profielen voor RTTT (road transport and traffic telematics) toepassingen. Al deze CEN standaarden werden goedgekeurd en gepubliceerd in 2003 en 2004.

Naast deze CEN standaarden werd door het ETSI de geharmoniseerde standaard "EN 300 674-2: dedicated short range communication transmission equipment (500 kbit/s 250 kbit/s) operating in the 5.8 GHz industrial, scientific and medical (ISM) band" goedgekeurd en gepubliceerd in 2004. Deze standaard bevat algemene en omgevingsafhankelijke test voorwaarden, meetmethoden en parameter grenzen. Het volgen van deze geharmoniseerde ETSI standaard leidt tot een naleving van Artikel 3 van het Directive 1995/5/EC van het Europese Parlement en van het R&TTE Directive.

Europese DSRC systemen volgen het principe van de passieve backscatter in de transponder. Deze methode heeft geen interne oscillator (voor het genereren van een 5.8 GHz radio draaggolf) in het on board equipment (OBE). De OBE vertrouwt op de 5.8 GHz oscillator van de roadside unit waarmee hij communiceert. Omdat de passieve transponder geen draaggolf oscillator heeft moet de roadside unit (tijdens het versturen vanaf de OBE) continu een ongemoduleerde draaggolf uitzenden. De OBE ontvangt dit signaal, geeft deze door aan zijn transmissiecircuit en creëert zijn eigen draaggolf. De transmissie data van de hoofdverwerkingseenheid moduleert de output van de sub-draaggolf oscillator en mengt dit met de draaggolf van de ontvanger. Resulterende sideband signalen die transmissiedata met verschillende frequenties (draaggolf frequentie plus/min sub-draaggolf frequentie) van de draaggolf meedragen worden verstuurd met de draaggolf. De sub-draaggolf modulatie methode wordt gebruikt om het communicatie bereik te vergroten dankzij reductie van de carrier phase noise en om de re-use afstand van RSE in passieve transponder systemen te verlagen. Het gemoduleerde signaal van de RSE wordt gedetecteerd in de detector en verwerkt door de hoofdverwerkingseenheid als ontvangen data. De communicatie zone van het passieve (transponder) systeem is heel klein, typisch tot 10 à 20 meter voor de RSE. Om dit bereik ietwat te vergroten kan een additionele radio frequentie versterker toegevoegd worden aan het transmissie circuit van de transponder.

Eén van de meest belangrijke eigenschappen van de passieve backscatter methode is het feit dat de OBE zeer eenvoudig is, met lage productie kosten als gevolg. Een andere eigenschap is de beperkte communicatie zone van 10 à 20 meter voor de RSE. Deze karakteristiek dat communicatie slechts kan plaatsvinden op een exact punt is bijzonder belangrijk bij het correct lokaliseren van het voertuig. Vele applicaties exploiteren deze eigenschap, zoals ETC, automatic vehicle identification (AVI), enz. ETC kan de fileproblematiek in de buurt van tolhuizen verminderen omdat deze toelaat dat voertuigen, zonder te moeten stoppen, door een tol poort rijden en betalen. Wanneer een voertuig door zo een tolpoort rijdt, communiceert de roadside antenne met de OBE (transponder) welke typisch aan de binnenkant van de voorruit is bevestigd. De toepasselijke tolheffing wordt dan automatisch toegevoegd aan de rekening van het betreffende voertuig. Voorbeelden van zulke systemen zijn Télépéage in Frankrijk en Tele-pass in Italië.

De technische eigenschappen van de Europese backscatter (transponder) methode worden samengevat in Tabel 6, welke een uittreksel is uit Recommendation ITU-R M.1453-2. Deze Recommendation verenigt de "Medium data rate" Europese standaard (CEN EN 12253) en de "High data rate" Italiaanse standaard in één enkele Recommendation. In de Europese DSRC standaard ondersteunt de OBE twee soorten sub-carrier frequenties (1.5 MHz en 2.0 MHz). Selectie van deze sub-carrier frequentie hangt af van het profiel aangeduid door de RSE (1.5 MHz wordt aangeraden). In het geval van de Italiaanse "High data rate" standaard is de OBE uplink sub-carrier frequentie 10.7 MHz, wat leidt tot een hogere uplink data transmissie snelheid.

	Medium data rate (European)	High data rate (Italian)
Carrier frequencies	5.8 GHz band for downlink	5.8 GHz band for downlink
Sub-carrier frequencies	1.5 MHz / 2 MHz (uplink)	10.7 MHz (uplink)
RF carrier spacing (channel separation)	5 MHz	10 MHz
Allowable occupied bandwidth	Less than 5 MHz/channel	Less than 10 MHz/channel
Modulation method	ASK (downlink carrier) PSK (uplink sub-carrier)	ASK (downlink carrier) PSK (uplink sub-carrier)
Data transmission speed (bit rate)	500 kbit/s (downlink) 250 kbit/s (uplink)	1 Mbit/s (downlink) 1 Mbit/s (uplink)
Data coding	FMO (downlink) NRZI (uplink)	
Communication type	Transponder type	Transponder type
Maximum e.i.r.p.	<= +33 dBm (downlink) <= -24 dBm (uplink: single sideband)	<= +39 dBm (downlink) <=-14 dBm (uplink: single sideband)

Tabel 6: Eigenschappen DSRC backscatter methode

Het grote voordeel van CEN DSRC voor toepassing in ITS systemen is de lage kost van de OBE, en het feit dat deze mature technologie de laatste jaren reeds zijn strepen verdiend heeft. Het grootste nadeel is het feit dat deze niet kan gebruikt worden voor voertuig-voertuig communicatie, omdat het gebaseerd is op passieve transponders. Ook is het communicatie bereik van 20 meter eerder beperkt, en is de maximum uplink data rate van 250 kbit/s ook aan de lage kant (althoewel dit laatste op te vangen is door gebruik te maken van de Italiaanse variant welke een aanvaardbare 1 Mbit/s kan aanbieden op de uplink).

6.2 IEEE 802.11p

IEEE 802.11p is een amendement bij de IEEE 802.11 standaard die ondersteuning toevoegt voor wireless access in the vehicular environment (WAVE). Deze standaard bevindt zich momenteel nog in de "draft" fase. Hij definieert verbeteringen aan de 802.11 standaard nodig voor het ondersteunen van ITS applicaties. Dit omvat onder andere gegevensuitwisseling in de gelicenciëerde 5.9 GHz ITS band (5.85-5.925 GHz) tussen snel bewegende voertuigen en tussen de voertuigen en weginfrastructuur. WAVE is een verzameling standaarden die dit mogelijk willen maken, IEEE 802.11p is hier een onderdeel van en omvat de MAC en PHY lagen van het ISO model. De hogere lagen worden behandeld door andere IEEE standaarden: IEEE 1609.4, IEEE 1609.3, IEEE 1609.2 en IEEE 1609.1.

De 802.11p Task Group is nog steeds actief. Volgens de officiële IEEE 802.11 Work Plan voorspellingen zou het goedgekeurde 802.11p amendement rond april 2009 gepubliceerd worden.

De IEEE 802.11p OFDM PHY is een variant op de OFDM gebaseerde IEEE 802.11 standaard. Hij werkt volgens exact dezelfde signaal verwerking en specificaties als de IEEE 802.11a standaard, behalve voor de volgende wijzigingen (Eichler, 2007):

- De gebruikte frequentie band is de 5.9 GHz Amerikaanse ITS band. Deze gereserveerde band bestaat uit 75 MHz, opgesplitst in 7 kanalen van 10 MHz en een veiligheidsmarge van 5 MHz onderaan de band. Het middelste kanaal is het controle kanaal waarop alle berichten m.b.t. veiligheid worden verzonden. De

overblijvende kanalen doen dienst als service kanalen, waarover lagere prioriteits communicatie wordt opgezet na overleg op het controle kanaal.

- Om een groter communicatiebereik mogelijk te maken in voertuigomgevingen werden vier klassen van maximum toegestane Effective Isotropic Radiated Power (EIRP) gaande tot 44.8 dBm (30W) vastgelegd in IEEE 802.11p. De hoogste waarde mag enkel gebruikt worden door aankomende prioritaire voertuigen (ambulance, politie, brandweer, ...). Een typische waarde voor berichten m.b.t. veiligheid is 33 dBm.
- Om de tolerantie voor multi-path propagatie effecten te verhogen van signalen in een voertuigomgeving worden kanalen van 10 MHz breed gebruikt. Als resultaat van deze verminderde frequentie bandbreedte verdubbelen alle parameters in het tijdsdomein van IEEE 802.11p in vergelijking met IEEE 802.11a PHY. Enerzijds vermindert dit de invloed van het Doppler effect dankzij de smallere frequentie bandbreedte, anderzijds leidt de verdubbeling van het guard interval tot een verlaging van de inter-symbool interferentie veroorzaakt door multi-path propagatie.
- Gevolg van het vorige punt is dat de data rate van alle PHY modes gehalveerd wordt. De belangrijkste eigenschappen van de IEEE 802.11p PHY worden samengevat in Tabel 7 (Fernández-Caramés, et al., 2008).

Parameter	Value(s)
Data rate (Mb/s)	3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24 and 27
Modulation	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Code rate	$\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{3}{4}$
# subcarriers	48 data + 4 pilots
OFDM symbol duration	8 μ s
Guard time	1.6 μ s
FFT period	6.4 μ s
Preamble duration	32 μ s
Subcarrier spacing	0.15625 MHz

Tabel 7: IEEE 802.11p PHY key parameters

Op de MAC laag wordt kanaaltoegang volgens prioriteit door IEEE 802.11p voorzien door gebruik te maken van de Enhanced Distributed Channel Access (EDCA) mechanismen die origineel werden voorzien door IEEE 802.11e. Deze omvat onder andere listen before talk (LBT) en een random back-off. De back-off bestaat uit een vaste en een random wachttijd. De vaste wachttijd is een aantal tijdslots vastgelegd door de parameter AIFSN, waarbij een tijdslot 8 μ s duurt. De random wachttijd is ook een aantal slots, maar de factor wordt bepaald a.d.h.v. een Contention Window (CW). De initiële grootte van het CW is bepaald door de parameter CWmin. Iedere keer wanneer een transmissie poging faalt wordt het CW verdubbeld totdat die even groot wordt als de parameter CWMax.

Prioriteit geven wordt gedaan door gebruik te maken van verschillende kanaaltoegangsparameters voor elke pakket prioriteit. Er zijn vier beschikbare prioriteitsklassen, origineel gedefinieerd voor background (AC_BK), best effort (AC_BE), voice (AC_VO) en video (AC_VI) verkeer.

Dankzij de sterk mobiele omgeving waarin IEEE 802.11p gebruikt wordt is het tijdsinterval waarin voertuigen binnen communicatie bereik zijn heel beperkt. Om optimaal gebruik te maken van deze korte tijdsperiode moet de communicatie overhead zo laag mogelijk zijn. Daarom is geen frame uitwisseling nodig op het wireless medium alvorens over te gaan tot de effectieve data transmissie. Een WAVE basic service set (BSS) wordt geïnitieerd door een provider station (STA) dat op regelmatige basis een WAVE service announcement (WSA) frame uitstuurt. Dit management frame is gelijkaardig aan het beacon frame in normale IEEE 802.11 infrastructure BSSs, maar er

zijn geen beperkingen m.b.t. transmissie intervallen. Er is ook geen authenticatie en geen associatieframe nodig om deel uit te maken van een WBSS, dit is een intern proces van de aansluitende STA. Aangezien het beacon frame niet wordt gebruikt is de timing synchronization function (TSF) niet beschikbaar. Om synchronisatie mogelijk te maken is een externe tijdsreferentie zoals GPS nodig.

In de VS werd de Dedicated Short Range Communication 5.9 GHz band voor gebruik in ITS systemen gealloceerd door de Federal Communiation Commission (FCC). Het ITS programma wordt beheerd door de Federal Highway Administration, Joint Program Office for ITS. In Europa werden de spectrum vereisten besproken door verschillende regulerende organen. CEPT werd gevraagd door het Radio Spectrum Committee (RSC) om de spectrum vereisten voor ITS na te gaan voor veiligheidskritieke applicaties binnen de EU, om de nodige graad van bescherming vast te leggen, om compatibiliteitsstudies uit te voeren en om een werkplan voor te stellen. De CEPT validatie van de spectrum vereisten voorgesteld door de industrie resulteerden in een verwachte nood aan 30-50 MHz. De compatibiliteitsstudie (Electronic Communications Committee, 2007) toonde aan dat bescherming mogelijk is in het bereik van 5.855 tot 5.925 GHz. Op 5 augustus 2008 werd 30 MHz gealloceerd voor ITS applicaties, van 5.875 tot 5.905 GHz ⁷. Dit spectrum zou door alle deelstaten gealloceerd moeten zijn tegen februari 2009.

IEEE 802.11p wordt door vele ITS publicaties beschouwd als bruikbare technologie voor voertuig-voertuig communicatie (Stibor, et al., 2007) (Hayashi, et al., 2007). Het kan ook gebruikt worden voor voertuig-infrastructuur communicatie, maar dit vraagt om installatie van devices langs de kant van de weg (zoals bv. in het COOPERS project). Voordeel van de technologie is de lage kost (aangezien deze gebaseerd is op de wijdverspreide IEEE 802.11 WLAN technologie, en gebruik maakt van gratis frequentie banden), en het potentieel om voertuig-voertuig diensten met een zeer kleine vertraging aan te bieden (wat niet mogelijk is met cellulaire technieken zoals GPRS en UMTS (Wewetzer, et al., 2007)). Deze WLAN gebaseerde aanpak krijgt ook de voorkeur van het Car 2 Car Consortium. Er moet wel opgemerkt worden dat meer onderzoek naar deze technologie nodig is, aangezien de huidige draft standaard last heeft van schaalbaarheidsproblemen: hij kan niet goed om met veel hoge prioriteitsberichten in een dicht scenario (Eichler, 2007) (Kosh, et al., 2006)..

6.3 CALM-M5

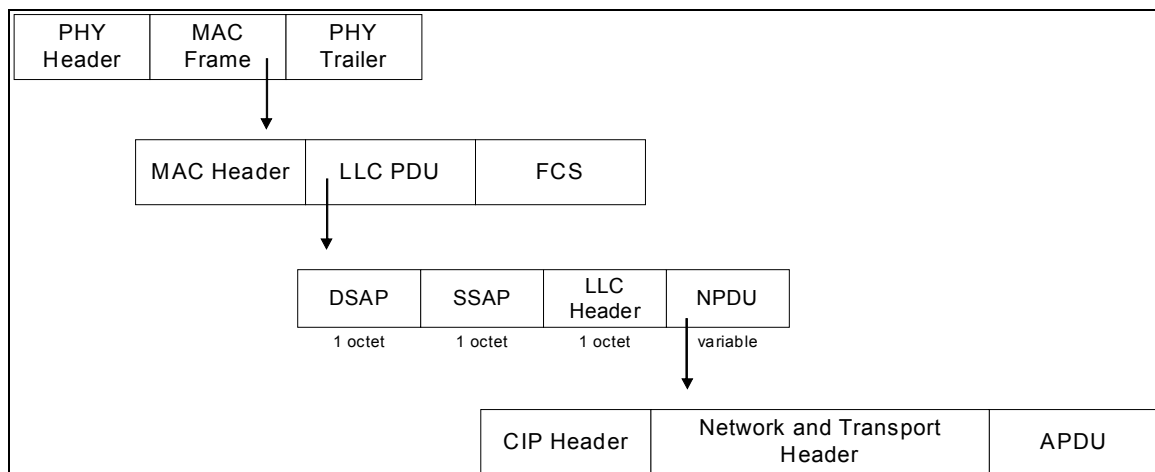
In de vorige sectie 6.2 werd IEEE 802.11p besproken. Deze standaard is geoptimaliseerd voor de ITS kanalen vastgelegd in de Verenigde Staten, de protocollen zijn geoptimaliseerd voor de huidige single-radio technologie en er wordt geen rekening gehouden met GSM of andere draadloze technologieën. CALM-M5 is een Europese standaard die de IEEE 802.11p standaard omvat en daaraan de volgende zaken toevoegt:

- Globaal (Europees) 5 GHz spectrum
- Regulerings management (rekening houden met de verschillende lokale regelgeving in de buurt van landsgrenzen)
- Controle van richting en elektromagnetische compatibiliteit
- Ondersteuning samengaan met CEN DSRC (interferentie beheer)

⁷ EC: Commission Decision of 5 August 2008 on the harmonised use of radio spectrum in the 5875 - 5905 MHz frequency band for safety-related applications of Intelligent Transport Systems (ITS) [Online] // EUR-lex. - 2008. - <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32008D0671:EN:NOT>.

- Beheer van meerdere radio's/interfaces/antennes
- Interconnectiviteit met GPRS/UMTS netwerken

Aangezien CALM-M5 afhankelijk is van de resultaten van de IEEE 802.11p ontwikkelingen, is de ontwikkeling van CALM-M5 voornamelijk inactief tot wanneer IEEE 802.11p een stabiele fase ingaat. Dan zullen extra functies worden toegevoegd, bv van de LL-SAP en Interface Manager⁸. De structuur van een M5 frame is afgebeeld in Figuur 2.



Figuur 2: CALM-M5 frame structuur

Er bestaan twee frame types in M5, management frames en data frames. Elk type is ingedeeld in twee subtypes, bij management frames zijn deze subtypes ACTION en BEACON, bij data frames zijn deze DATA en QoS DATA. Het gebruik van management frames via M-SAP zal beperkt zijn tot datapakketten van CALM management applicaties. De "heart beat" berichten zullen behandeld worden als user data, en niet als management data.

Een M5 MAC header is afgebeeld in Figuur 3.

⁸ Meer technische details te vinden in : ISO TC204 WG16 Workshop on M5 [Online]. - September 2008. - December 2008. - <http://www.isotc204wg16.org/pubdocs/M5%20Workshop%20Chicago/HJF%20Workshop%20M5.ppt>.

MAC Header		LLC PDU			FCS					
Frame Control	Duration / ID	Address 1	Address 2	Address 3	Sequence Control	QoS Control				
2 octets <i>see below</i>	2 octets <i>see below</i>	6 octets <i>destination</i>	6 octets <i>source</i>	6 octets <i>equal to zero</i>	2 octets <i>see below</i>	2 octets <i>see below</i>				
Table 6 — QoS control field elements										
Bit numbers	Element	Value	Explanation							
3 – 0	TID	0 – 7	Priority of packet, see tables 11 and 12.							
		8 – 15	Reserved for future use							
4	EOSP	'0'	Defines meaning of bits 8 – 15							
6 – 5	Ack Policy	'10'	No acknowledgement frames							
7	reserved	'0'	Reserved for future use							
15 – 8	EOSP = '0': TXOP Duration Requested	'0'	Not applicable, as CALM M5 is not supporting the concept of a BSS.							
	EOSP = '1': Queue Size									
Protocol Version	Type	Subtype	To DS	From DS	More Frag	Retry	Pwr Mgt	More Data	WEP	Order
2 bits <i>see below</i>	2 bits <i>see below</i>	4 bits <i>see below</i>	1 bit '0'	1 bit '0'	1 bit '0'	1 bit '0'	1 bit '0'	1 bit '0'	1 bit '0'	1 bit '0'

Figuur 3: CALM-M5 MAC header

Kanaaltoegang wordt ook vastgelegd door de CALM-M5 standaard. De "Distributed Coordination Function" (DCF) welke "Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance" (CSMA/CA) toepast, zal verplicht zijn met de beperking dat de controle frames "ACK", "RTS" en "CTS" zoals bepaald in IEEE std 802.11-2007 niet moeten gebruikt worden.

De standaard maakt alleen gebruik van contention-based kanaaltoegang, waardoor de "Enhanced Distributed Channel Access" (EDCA) methode gedefinieerd in IEEE std 802.11-2007 verplicht is en de "HCF Controlled Channel Access" (HCCA) methode gedefinieerd in dezelfde standaard verboden. De EDCA parameters worden niet onderhandeld over de air link, maar worden op voorhand vast bepaald.

Samengevat, de CALM-M5 standaard is de Europese versie van de IEEE 802.11p standaard, overeenstemmend met het Europese spectrumbeleid en compatibel met de ISO CALM architectuur. De CALM-M5 standaard kent dezelfde voor- en nadelen als de IEEE 802.11p standaard.

6.4 CALM-IR

Een essentiële basisvereiste van toekomstige ITS communicatie is de mogelijkheid om ad-hoc verbindingen op te zetten en Kbytes data te versturen binnen enkele milliseconden. Het meest cruciale en tijdsroevende gedeelte in een omgeving met meerdere communicatie nodes is de procedure voor het opzetten van een link, vooral in een situatie in de vrije ruimte, waarbij link omstandigheden snel en onvoorspelbaar kunnen veranderen.

ISO-CALM Infrared, de nieuwe ISO-standaard (ISO 21214) voor voertuig-voertuig en voertuig-infrastructuur communicatie biedt een oplossing aan voor dit probleem. De standaard beschikt over simpele methoden om andere communicatiepartners direct te adresseren en met hen te communiceren op een richtings-gebaseerde manier. Infrarood communicatie is uitermate geschikt voor het vormen van communicatiezones. In deze zones zijn hoge datarates mogelijk zijn voor up- en download, en dankzij de

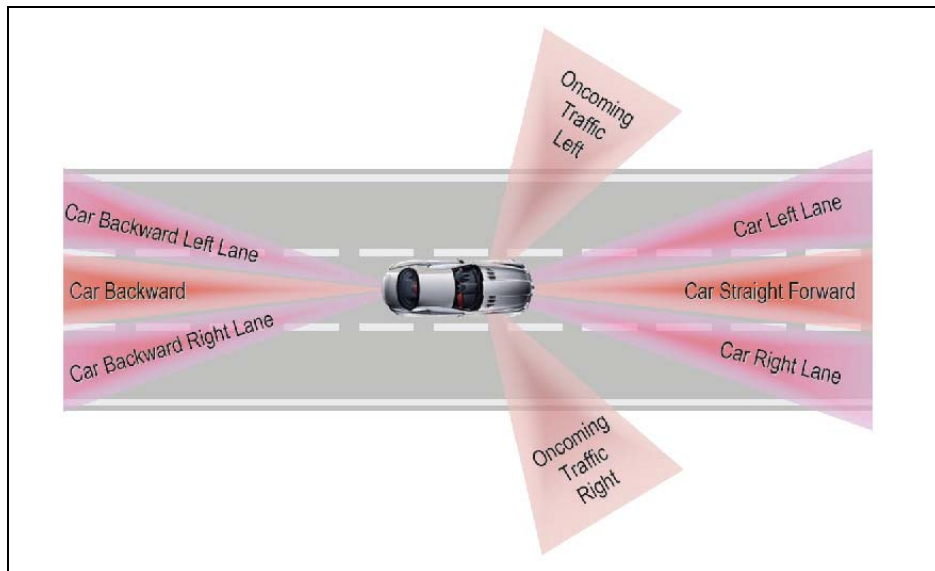
richtingsgevoelige eigenschappen kunnen ze genieten van een hoge betrouwbaarheid en bescherming van de privacy (Schalk, et al., 2008).

ISO CALM-IR bepaalt de air interface die gebruik maakt van infrarood systemen op 800 tot 1000 nm. De standaard definieert ook de protocollen en parameters voor medium range, medium tot high speed wireless communicatie in de ITS sector gebruik makende van infrarood systemen.

CALM-Infrared biedt aan:

- Actieve communicatie
- Bereik hoger dan 100 meter
- Hoge bruikbare netto data rate
- Multi-beam directionele capaciteit

CALM-IR laat de coördinatie toe van data stromen vanuit verschillende richtingen (beams, zie Figuur 4). Er wordt gebruik gemaakt van een TDMA protocol om de verschillende communicatiepartners in iedere richting af te handelen.



Figuur 4: CALM-IR richtingen

Het gebruik van meerdere gerichte beams in een voertuigomgeving kent verschillende voordelen. Beams gericht naar vooraan rechts/links kunnen worden gebruikt voor verkeersinformatie (bv komende van verkeersborden); voorwaartse, achterwaartse en zijwaartse beams kunnen worden gebruikt voor communicatie met andere voertuigen, en de naar boven gericht beams kunnen worden gebruikt voor tol toepassingen en andere betalingen (bv benzinstation). Er is dus een brede waaier van nuttige communicatie toepassingen mogelijk.

Infrarood is zeer sterk in het vormen van beams of stralenbundels. Het is eenvoudig om een nauwe of brede, scherp afgelijnde of wazige beam te creëren, afhankelijk van de applicatie. Met slechts een paar optische instrumenten en infrarood is het mogelijk om scherp afgelijnde beams te creëren die nauwkeurig een communicatie zone definiëren. Een voorbeeld hiervan is het gebruik van infrarood in het Duitse tolhefsysteem voor vrachtwagens. Infrarood heeft, in tegenstelling tot radio gebaseerde technologieën, geen last van interferentie met andere media. De niet-interfererende beams maken een zeer

efficiënt gebruik van de bandbreedte mogelijk, wat leidt tot een hoge netto data rate op elk CALM-IR kanaal.

Een ander voordeel van het gebruik van communicatiezones in voertuig-voertuig communicatie scenario's is het feit dat informatie verder verstuurd kan worden in de richting waar deze van belang is. Bijvoorbeeld een waarschuwing over een gladde plek op het wegoppervlak is van geen belang voor voertuigen die deze plek reeds passeerden. Dankzij dit slimme forwarden kan de hoeveelheid gecommuniceerde data efficiënt verminderd worden.

Samengevat brengt infrarood communicatie de volgende voordelen met zich mee:

Infrarood ...

- maakt gerichte communicatie mogelijk
- kan heel snel links opzetten (<10 ms)
- kan uitstekend beams vormen
- maakt kostefficiënte multi-beam antennes mogelijk voor gecontroleerde directiviteit
- definieert communicatie zones met scherpe grenzen
- ondersteunt meerdere links binnen een communicatie zone, onafhankelijk van elkaar
- biedt hoge bandbreedte aan
- kan voldoen aan vertragingvereisten van enkele milliseconden
- ondersteunt afstandsschatting tot de communicatiepartner, met een nauwkeurigheid van een paar meter.
- heeft een netto throughput die de nominale throughput benadert
- heeft bijna geen last van elektromagnetische compatibiliteitsproblemen
- communicatie heeft veel minder problemen met voorruitvervuiling van een metalen coating dan bij microgolven
- biedt communicatie vrij van interferentie aan
- opereert in vrij spectrum

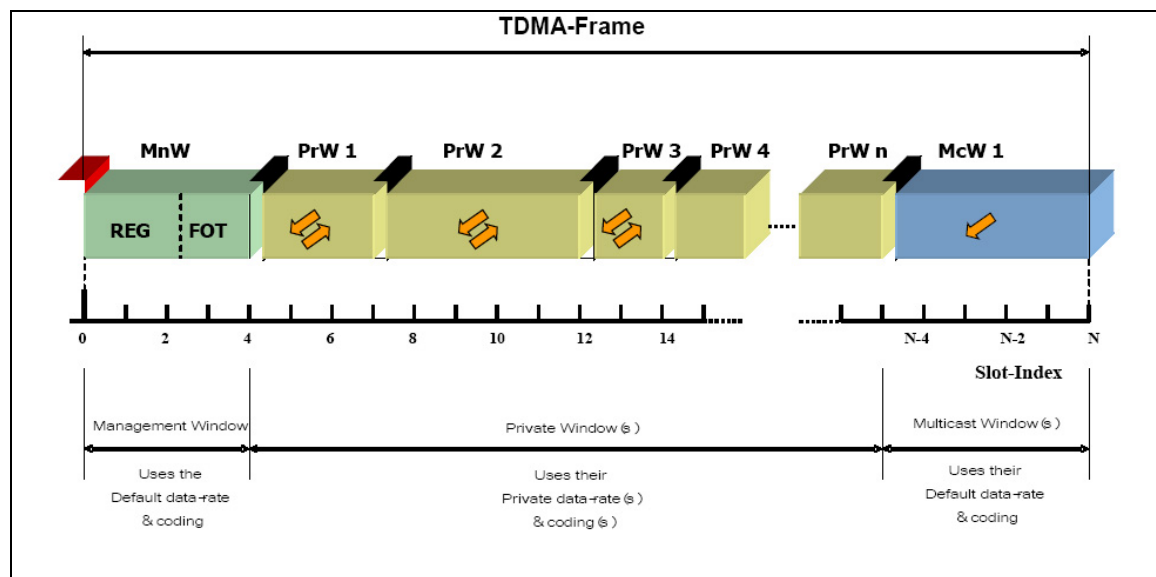
Binnen de CALM-IR standaard zijn data rates mogelijk van 1, 2, 8, 16, 32, 64, 128 en in de toekomst 512 Mbit/s (1 Mbit/s = Base rate, 2 Mbit/s = Default rate). De snelheid kan afhankelijk gemaakt worden van de signal to noise ration (S/N). Elk communicatie toestel kan communiceren met alle lagere snelheden om neerwaartse compatibiliteit te bereiken met "lage-snelheids" toestellen (tenminste met "Base rate" en "Default rate"). De te gebruiken datasnelheid wordt onderhandeld tijdens het opzetten van de link en kan tijdens de communicatiesessie veranderd worden. De modulatieschema's van CALM-IR zijn geoptimaliseerd voor de verschillende voorgestelde datasnelheden. Het TDMA schema van CALM-IR maakt een zeer snelle link setup mogelijk. Het protocol zet een nieuwe communicatie link op, wisselt data uit op die link en sluit de link, dit allemaal binnen een enkel frame. Daarenboven kan CALM-IR ook zeer snel links terug opzetten na korte onderbrekingen met slechts een enkel frame. De informatie bits van de data worden tegen fouten beschermd door vier Error Correction Bits (EC0, EC1, EC2, EC3). Er wordt gebruik gemaakt van een aangepaste Hamming Code met lengte $L=12$ en een Hamming-afstand van minstens $D=3$. Tijdens een transmissie worden altijd eerst de data bits doorgestuurd, in volgorde D0, D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, gevolgd door de error correction bits EC0 t.e.m. EC3.

Zoals reeds vermeld definieert de CALM-IR standaard een TDMA schema als media toegangsmethode voor gesynchroniseerde communicatie tussen verschillende communicatie partners. In zulke omgeving bestaat er steeds exact één master, welke de organisatie van de TDMA sequentie bepaalt. Als er nog geen dedicated master bestaat

dan wordt een procedure opgestart die een nieuwe master vastlegt. Directe "slave to slave" communicatie vereist dat een van de slaves dienst doet als een tijdelijke master.

Het CALM-IR frame bestaat uit Nframe tijdsloten en is gedefinieerd en georganiseerd door de master. De frame structuur is gedefinieerd door middel van gereserveerde signalen die nooit kunnen voorkomen in een datastroom. Dat laat simpele elektronische circuits voor detectie toe zonder de noodzaak om constant de datastroom op te volgen en te analyseren.

Het CALM-IR TDMA frame wordt aangemaakt door de master, start met een specifiek frame synchronisatie signaal (F-sync) en is onderverdeeld in verschillende tijdsloten. De maximale lengte van het frame is 256 tijdsloten. Het CALM-IR TDMA frame is verder onderverdeeld in communicatie windows, en elk frame bevat tenminste één window.

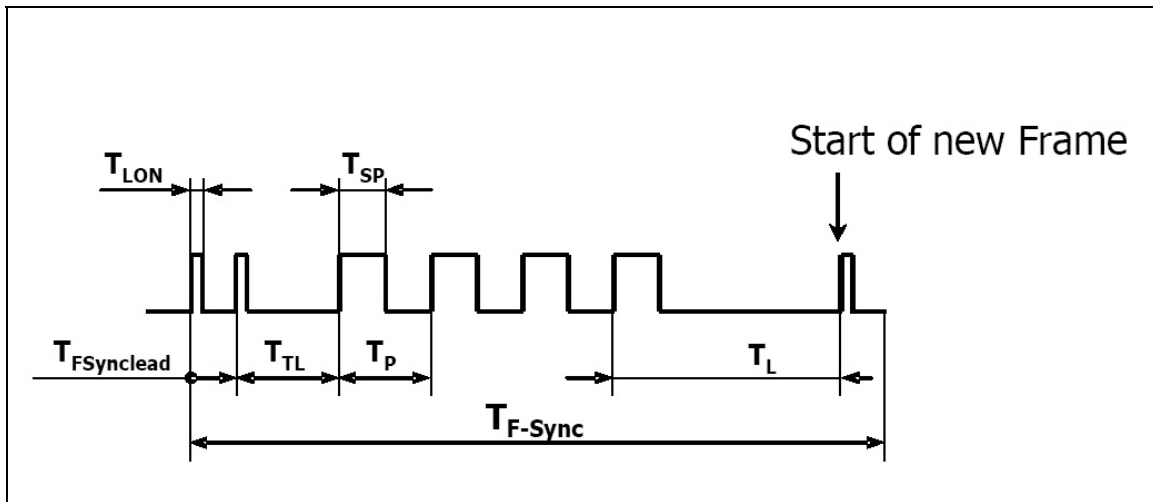


Figuur 5: CALM-IR TDMA frame

Elk window wordt geïnitieerd door een specifiek window synchronization signal (W-sync). Het maximum aantal windows binnen een enkel frame is een dynamische parameter en hangt af van de grootte van de windows. Het eerste window van een CALM-IR TDMA frame is altijd het management window.

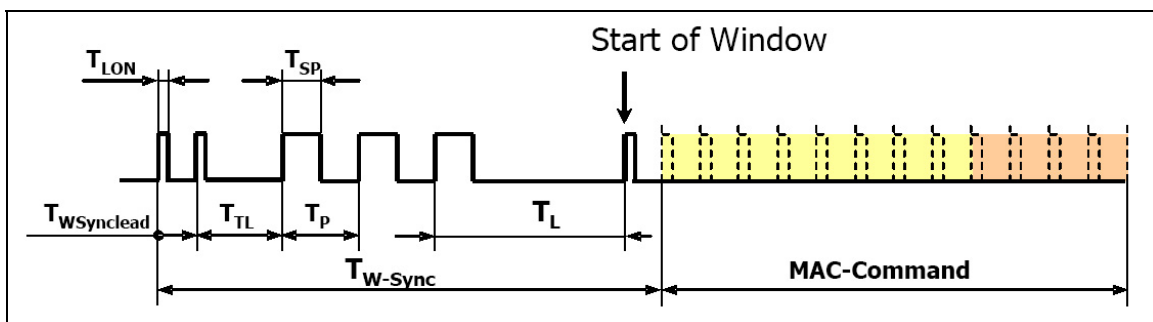
Het frame synchronisatie signal wordt gegenereerd door de master aan het begin van een frame en initieert het management window. Alle actieve slaves die niet in een "transmit-toestand" zijn, zijn klaar om een F-Sync signal te herkennen. Een frame synchronisatie signal kan ook frames onderbreken die op dat moment worden verzonden, bv om voorrang te geven aan noodoproep berichten.

Een Frame-Sync wordt nooit direct na een "receive state" van de master verzonden. In dit geval wordt een guard interval van 5µs tussengevoegd voor het zenden van het Frame-Sync. Dit geeft de ontvangst-schakelsystemen van alle slaves de kans om zich eerst opnieuw te vestigen.



Figuur 6: I-CALM-IR Frame Synchronization signal (F-Sync)

Het window synchronisatie signal start alle ander soorten windows (Private / Multicast / Broadcast en Compatibility Windows).



Figuur 7: CALM-IR Window Synchronization Signal (W-Sync)

Het W-Sync signal kan licht asynchroon met het tijdslot lopen. Daarom wordt de slave gestart op een bepaalde tijd voor de start van het tijdslot. De Window-Sync wordt altijd gevolgd door een MAC-Command.

Dankzij de shaping eigenschappen van infrarood en de rangschikking van de beams volgens de ISO-CALM Infrared Standard is een bepaling van de geografische oorsprong van een communicatiepartner makkelijk mogelijk. Data kan geclassificeerd worden volgens belang (bv te maken met gebeurtenissen voor / achter het voertuig of in de tegengestelde richting bij voertuig-voertuig communicatie) of kan gewoon genegeerd worden dankzij die kennis over de geografische oorsprong van de data. In ISO-CALM Infrared worden verschillende klassen van toestellen gedefinieerd. Deze klassen helpen bij het opzetten en organiseren van ad-hoc netwerken, zelfs in situaties waarbij één of meerdere partners in beweging is. Een snelle en simpele registratieprocedure laat toestellen van verschillende of gelijke klassen toe om tegelijk master, slave of beide (submaster) in netwerken te worden.

Samengevat is CALM-IR een technologie voor lokale voertuig-voertuig en voertuig-infrastructuur communicatie, gebaseerd op infrarood. Het gebruik van infrarood maakt het mogelijk om communicatie richtingsafhankelijk te laten werken, en wel omliggende communicatiezones te definiëren. Dit is niet mogelijk met communicatietechnieken

gebruik makende van microgolven zoals IEEE 802.11p of CALM-M5. Dit kan een voordeel zijn (bv communicatie van infrastructuur naar specifieke rijvakken, efficiënter spectrum gebruik door minder interferentie, ...), maar in sommige gevallen ook een nadeel. In scenario's met zeer weinig voertuigen bv, kan het nodig zijn dat informatie omnidirectioneel wordt uitgestuurd zodat deze door voertuigen waarvoor de data niet bestemd is (bv verkeer in de tegengestelde richting) kan worden opgepikt en later terug verstuurd aan het aankomende verkeer.

6.5 CALM-MM

CALM-MM is een communicatietechnologie die gebruik maakt van de millimeter wave band (30 – 40 GHz en 60-64 GHz). Deze technologie ondersteunt lokale, richtingsgevoelige communicatie. Verschillende fysische propagatie-eigenschappen in vergelijking met CALM-IR maken CALM-MM complementair met CALM-IR voor veiligheidstoepassingen, waar verschillende simultane communicatiepaden vereist zijn. MM laat veel hogere datarates toe (grootteorde van honderden Mbps) met een bereik van enkele honderden meters. Richtingsgevoelige communicatie is nuttig aangezien het communicatiebereik beperkt kan worden tot een specifiek object of verzameling van mobiele objecten (CVIS project, 2006).

De millimeter-wave band is gedefinieerd als de frequenties tussen 60-64 GHz of banden tussen 30 en 40 GHz (Mahmod et al., 2008). Millimeter wave op 60 GHz ondersteunt directe communicatie tussen voertuigen zonder het gebruik van vaste infrastructuur. In vergelijking met CALM-IR heeft MM op 60 GHz drie grote voordelen: het wordt minder beïnvloed door weersomstandigheden, minder gevoelig voor interferentie van zonlicht, en kan zelfs communicatie opzetten in omstandigheden waarbij geen line-of-sight mogelijk is door gebruik te maken van multi-path propagatie. Andere voordelen van millimeter wave zijn:

- hoge capaciteit voor hogesnelheids breedband communicatie
- mogelijkheid tot een lager aantal interfererende signalen dankzij het hoge niveau van attenuatie
- mogelijkheid tot integratie met onboard radar systemen waarmee het elektronica kan delen
- mogelijkheid om kleine antennes en RF schakelingen te gebruiken die makkelijk kunnen geïntegreerd worden in voertuigen en infrastructuur

Er zijn ook een aantal nadelen verbonden aan de techniek: communicatie kan beïnvloed worden door de relatieve beweging tussen de voertuigen (door de korte golflengte), de technologie is nog niet even ver ontwikkeld als CALM-IR en CALM-M5, sterke signal fading kan voorkomen (door de interferentie tussen de directe en gereflecteerde golven), en het is moeilijk om langeafstands transmissie mogelijk te maken (omdat de radio golven atteneren in de ruimte). Alhoewel deze laatste ook als een voordeel kan worden beschouwd omdat deze een beter frequentiehergebruik en een betere beveiliging mogelijk maakt. Samengevat wordt millimeter wave communicatie best gebruikt voor applicaties met een klein tot middengroot bereik (gaande van enkele meters tot een kilometer), en biedt deze een data rate aan van enkele honderden megabits per seconde.

6.6 IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 is een communicatie standaard die veel gebruikt wordt in Sensor and Actuator Networks (SANET). Voorbeeldapplicaties zijn wireless building automation, waarin netwerken tot enkele tienduizenden knopen in een enkel kantoorgebouw worden

uitgerold, of landbouw monitoring waar ze gebruikt worden om klimaatsomstandigheden van verschillende zones van grote landbouwgebieden op te volgen (Baronti et al., 2007). Eén van de belangrijkste eigenschappen van deze standaard is de energie-efficiëntie, omdat knopen typisch jarenlang op eenzelfde batterij moeten kunnen opereren.

Ondanks het feit dat deze standaard niet specifiek ontwikkeld werd in het kader van ITS applicaties (in tegenstelling tot bv IEEE 802.11p of CALM-M5), wordt deze in dit domein meer en meer vermeld, voornamelijk in de context van het opnemen van de zwakke weggebruiker in de ITS biotoop (bv in het Watch-Over project⁹). Zwakke weggebruikers beschikken namelijk niet over een krachtige autobatterij als stroombron, en zijn dus genoodzaakt om zeer efficiënt met energie om te gaan. Daarnaast wordt in recent onderzoekswerk ook gekeken naar IEEE 802.15.4 als communicatie medium voor klassieke voertuig-voertuig en voertuig-infrastructuur communicatie (Eamsomboom et al., 2008), en wordt deze al toegepast in de praktijk (bv in een collision warning systeem voor grote dumptrucks in een mijn in India (Anurag et al., 2008) of het CAPTIV onderzoeksprogramma rond communicatie tussen voertuigen en intelligente wegborden (Berder et al., 2008).

De IEEE 802.15.4 definieert de PHY en MAC laag uit het ISO model. Hierbij wordt sterk de nadruk gelegd op extreem lage kost, lage data rate, betrouwbare dataoverdracht, short-range communicatie en een aanvaardbare levensduur van de batterij. De fysische laag ondersteunt drie frequentiebanden: een 2450 MHz band (met 16 kanalen met een bruto datarate van 250 kbps), een 915 MHz band (met 10 kanalen met een bruto data rate van 40 kbps) en een 868 MHz band (1 kanaal met een bruto data rate van 20 kbps). Deze maken allemaal gebruik van Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) modulatie.

De MAC laag definieert twee soorten knopen: Reduced Function Devices (RFDs) and Full Function Devices (FFDs). FFDs beschikken over alle MAC laag functies, terwijl RFDs slechts over een gedeeltelijke implementatie beschikken. FFD kunnen berichten van andere nodes doorsturen, terwijl RFDs alleen kunnen communiceren met een enkele FFD. Een FFD kan ook verkozen worden om de rol van netwerk coördinator op zich te nemen. Het voordeel van een RFD is dat deze goedkoper is om te produceren, en minder stroom verbruikt. Het bestaan van beide klassen van toestellen maakt het mogelijk om SANET installaties te optimaliseren qua kost en batterij levensduur.

Bovenop deze PHY en MAC laag standaardiseert ZigBee de hogere lagen van de protocol stack. De ZigBee Alliance is een associatie van bedrijven die samenwerken aan standaarden (en producten) voor betrouwbare, kostenefficiënte, low-power wireless networking. De netwerklaag is verantwoordelijk voor het organiseren en aanbieden van routing over een multi-hop netwerk (draaiende bovenop de IEEE 802.15.4 functionaliteit), terwijl de applicatielaag een framework aanbiedt voor de ontwikkeling van gedistribueerde applicaties.

Twee van de meest belangrijke onderzoeksonderwerpen in het SANET networking domein zijn routing en energie efficiëntie. Op gebied van routing verschilt de ZigBee aanpak significant van de ideeën en concepten die in recente routeringsprotocollen worden voorgesteld. ZigBee volgt een aanpak gebaseerd op het AODV routeringsprotocol, terwijl recent onderzoek meer focust op geografisch routeren, zowel gebaseerd op fysische als virtuele coördinaten. Deze geografische benadering wordt gevolgd omdat er een noodzaak is aan schaalbare routeringsprotocollen voor zeer grote sensornetwerken. Energie efficiëntie wordt door de ZigBee standaard vooral beoogd op de fysische en MAC laag. ZigBee ondersteunt twee modus operandi. De ene is gebaseerd op een TDMA algoritme en is zeer doeltreffend maar beperkt tot een stervorming netwerk waarin fijnschalige kloksynchronisatie en slot assignment makkelijk door de coördinator kan

⁹ <http://www.watchover-eu.org/>

worden aangeboden. De andere is gebaseerd op CSMA en probeert zoveel mogelijk het stroomverbruik te reduceren door gebruik te maken van zeer lage duty cycles. Door de onderzoeksgemeenschap werden nog een aantal andere technieken voorgesteld op de MAC laag, maar deze kunnen in het algemeen moeilijk overweg met verschillende datarates. Recent werden ook oplossingen naar voren gebracht gebaseerd op samenwerking tussen de verschillende lagen van de protocolstack. Deze cross layer manier van werken kan gebruik maken van informatie van de netwerklaag en/of de applicatielaag om de radio meer efficiënt aan te sturen en effectieve data rates in rekening te brengen.

Een belangrijke eigenschap voor het gebruik van IEEE 802.15.4 in ITS systemen is ondersteuning voor mobiliteit. De snelle bewegingen van nodes zorgen ervoor dat het netwerk zich snel dynamisch moet kunnen aanpassen. Routeringsprotocollen moeten deze problematiek in rekening brengen. Dit wordt momenteel in het SANET onderzoek zo goed als niet aangepakt, en moet dus nog verder onderzocht worden. De positieve eigenschappen met betrekking tot energieverbruik zorgen er echter voor dat dit verdere onderzoek zeker de moeite waard is en IEEE 802.15.4 ook zijn plaats in de ITS omgeving zou kunnen veroveren.

6.7 Besluit

In het kader van ITS toepassingen kunnen een groot aantal communicatietechnologieën gebruikt worden (zie Tabel 5). Wanneer we echter specifiek naar intelligente verkeersregelinstanties op kruispunten kijken, dan komen alleen nog de lokale technieken in aanmerking: CEN DSRC, IEEE 802.11p, CALM-M5, CALM-IR, CALM-MM en IEEE 802.15.4.

Deze 6 technologieën kunnen onderverdeeld worden in drie grote groepen: omnidirectionele communicatie speciaal ontwikkeld voor gebruik in voertuigen (CEN DSRC, IEEE 802.11p en CALM-M5), directionele communicatie speciaal voor gebruik in voertuigen (CALM-IR en CALM-MM) en omnidirectionele communicatie niet ontwikkeld voor gebruik in voertuigen (IEEE 802.15.4).

Voor gebruik in Europese verkeersregelinstanties valt CEN DSRC weg als mogelijk communicatiemiddel omdat deze slechts kan communiceren in één richting. IEEE 802.11p valt ook weg omdat deze gebruik maakt van de ITS frequenties uit de VS. De hiervan afgeleide Europese variant CALM-M5 is wel een uitermate geschikt communicatiemedium, aangezien deze gebruik maakt van de Europees vastgelegde ITS frequenties. Wel zal deze net als IEEE 802.11p last hebben van schaalbaarheidsproblemen, en moeten hier dus geschikte, schaalbare routeringsprotocollen voor ontwikkeld worden.

Op het gebied van directionele communicatie komen de beide Europese standaarden, CALM-IR en CALM-MM in aanmerking. Op korte tot middellange termijn is CALM-IR wel in het voordeel omdat deze technologie al veel verder ontwikkeld is dan CALM-MM.

IEEE 802.15.4 is de technologie die het best geschikt is voor gebruik in mobiele toestellen, dus voor het opnemen van de zwakke weggebruiker in het intelligent kruispunt. Vereiste hiervoor is echter wel dat de gebruikte routeringsprotocollen mobiliteit ondersteunen. Hiervoor is verder onderzoek nodig.

Als besluit kan er gesteld worden dat er op korte tot middellange termijn drie communicatietechnologieën in aanmerking komen voor de implementatie van intelligente verkeersregelinstanties: CALM-M5, CALM-IR en IEEE 802.15.4. CALM-M5 is geschikt voor omnidirectionele communicatie met voertuigen, CALM-IR voor directionele communicatie met voertuigen, en IEEE 802.15.4 voor omnidirectionele communicatie met zwakke weggebruikers. Verder onderzoek naar geschikte routeringsprotocollen is wel

nodig alvorens CALM-M5 en IEEE 802.15.4 succesvol zullen kunnen worden gebruikt in intelligente verkeersregelininstallaties.

7. RESEARCH PROJECTEN INTELLIGENTE VERKEERSLICHTEN

Verschillende Europese onderzoeksprojecten handelen over het gebruik van intelligente verkeersregelininstallaties. Daarnaast experimenteren verschillende autoconstructeurs met gelijkaardige oplossingen. Dit hoofdstuk verzamelt de meest relevante resultaten in dit domein.

7.1 Tovergroen

7.1.1 Probleemstelling

Vertrekpunt voor het Nederlandse project Tovergroen was de luchtkwaliteit en niet de verkeersveiligheid. Het risico van roodlichtnegatie van vrachtverkeer werd in dit onderzoek niet geanalyseerd. Enkel het faciliteren van de doorstroming van het vrachtverkeer –in functie van minder uitstoot en verbruik- was het uitgangspunt.

Het hoeft nauwelijks aangeduid dat op vele plaatsen maatregelen moeten genomen worden om de luchtkwaliteit te verbeteren. Het vrachtverkeer draagt op een belangrijke wijze bij tot de problemen met de luchtkwaliteit. Vermits dat bij stoppen en vertrekken bij alle voertuigen de meeste energie/brandstof noodzakelijk is, hangt daarmee samen een toename van de emissies. Indien men dit stoppen en opnieuw vertrekken, kan reduceren, is het mogelijk een bijdrage te leveren tot het verminderen van de uitstoot.

Verkeersregelininstallaties (VRI's) zijn voor de wegbeheerder instrumenten om het verkeer te regelen en te sturen. Ze worden daarbij ingesteld op een optimale verkeersafwikkeling; in principe kan dit aangepast worden zowel naar dal als naar spits.

Buiten de spits is mogelijk de verkeersregelininstallatie op een andere manier af te stellen. Zo is het mogelijk om via beperkte aanpassingen vrachtauto's in de dalperioden prioriteit te geven verkeerslichten.

Het gaat hierbij om het op subtiele wijze anders afstellen van de verkeersregelininstallatie waarbij zoveel mogelijk wordt voorkomen dat vrachtauto's tot stilstand komen. Daarbij moeten eventuele negatieve effecten, in het bijzonder voor het langzame verkeer, beperkt blijven.

Men kan op deze wijze volgende voordelen voor het vrachtverkeer voor vrachtverkeer creëren:

- minder uitstoot van fijn stof en NOx
- minder uitstoot van CO2
- minder geluidsbelasting
- vrachtauto's gebruiken minder brandstof
- reistijd voor de vrachtauto's wordt korter

Daar tegenover staat wel de extra verliestijd voor overige weggebruikers. De extra verliestijd voor overige weggebruikers kan sterk worden beperkt door te kiezen waar, wanneer en in welke mate deze technieken worden toegepast: in de dalperioden is er ruimte; de verliestijden voor het overige verkeer kan zo beperkt worden. Vooral in de avond en nacht is er minder tot weinig langzaam verkeer dat er op die momenten veel ruimte is voor deze maatregel.

7.1.2 Beschrijving onderzoek Tovergroen

In 2005 werd op 2 VRI's (op de N65 / Monseigneur Zwijsenstraat – Koolhofweg in de gemeente Haaren en op de N65 / Heusdensebaan op de grens van de gemeenten

Oisterwijk en Haaren) Tovergroen ingesteld (Arane, 2004). Deze twee VRI's zijn gelegen tussen 's Hertogenbosch en Tilburg en de onderlinge afstand bedraagt circa 1,9 km en er zijn geen tussengelegen kruispunten.

Tovergroen is een systeem om vrachtwagens selectief te detecteren en indien mogelijk vervolgens prioriteit te verlenen door hun groenfase te verlengen.

Op 300 m van de stopstreep, ter hoogte van het voorwaarschuwingsein, zijn selectieve detectiesystemen geplaatst. Deze systemen melden aan de regelapplicatie wanneer een vrachtwagen of bus is gedetecteerd en bepalen de snelheid van dit voertuig. Als de richting in groen is, wordt bepaald of het voertuig met deze snelheid de stopstreep kan bereiken binnen de maximumgroentijd + een extra tijd. Indien dit het geval is dan wordt de bestuurder hierover geïnformeerd via een oplichtend groenegolfsymbool op 200m van de stopstreep (Zondag, 2007).



Vermits dit systeem zowel vrachtvervoer als bussen kan detecteren, zou –indien het systeem voldoende betrouwbaar is- kunnen gebruikt worden voor een automatische verkeerslichtenbeïnvloeding voor het openbaar vervoer.

7.1.3 Resultaten

Het detectiesysteem functioneerde niet optimaal en vrachtwagens werden ofwel niet herkend of verkeerde voertuigen (auto met kampeerwagen, grote campers, ...) worden als vrachtwagens aangeduid.

Roodlichtrijders

Er werd verwacht dat met Tovergroen Actief er minder roodlichtrijders op de richtingen met Tovergroen zouden worden waargenomen. Voor alle voertuigen leidt Tovergroen op de richting die Tovergroen heeft tot een geringe vermindering van het aantal roodlichtrijders terwijl op de andere richtingen (korte periodes) er geen duidelijk effect is waar te nemen (Zondag, 2007).

Voor roodlichtrijdende vrachtwagens werd verwacht dat er aanzienlijk minder roodlichtrijders op de richting met Tovergroen zouden zijn. Deze hypothese werd door de analyse bevestigd: aanzienlijke afname van het aantal roodlichtrijders.

Op de hoofdrichtingen leidt Tovergroen tot een iets langere gemiddelde groenduur (niet groter dan 5 %). Vermits er op de dwarsrichtingen vrijwel geen direct effect op de gemiddelde groenduur is, is het effect op de cyclustijd beperkt tot het verschil in groenduur van de hoofdrichting.



Met betrekking tot de maximale wachttijd, leidt Tovergroen tot een geringe toename van de wachttijd terwijl op de dwarsrichtingen Tovergroen leidt tot een grotere toename van de wachttijd (ongeveer een 5 % toename van de wachttijd).

Voor vrachtverkeer leidt Tovergroen tot een duidelijke grotere doorrijkans; het effect ligt tussen de 5 % en 10 % op etmaalbasis terwijl voor het overige verkeer de doorrijkans in geringe mate toeneemt.

De gemiddelde snelheden op de verschillende detectiepunten verschillen weinig; in de verdeling over de klassen komen onverwacht grote verschillen voor.

Tovergroen AAN of UIT maakt zeer weinig verschil, de verschillen tussen AAN en UIT zijn kleiner dan die tussen de kruispunten en richtingen onderling.

Er komen minder vrachtwagens als eerste voertuig voor de stopstreep tot stilstand. De afname bedraagt ten minste 20% gemiddeld over de tovergroenrichtingen. Dit is van belang omdat een traag optrekkende vrachtwagen de effectieve afrijcapaciteit van die

rijstrook vermindert.

In het evaluatieonderzoek werd ook de luchtkwaliteit onderzocht. Men verwachtte dat Tovergroen een meetbaar effect op de luchtkwaliteit zou hebben.

19.

Tabel 27: procentueel effect Tovergroen op luchtkwaliteit

kruispunt	% NO ₂ afname	% PM ₁₀ afname
Mgr. Zwijsenstraat (Haaren)	1,06	0,68
Heusdensebaan (Oisterwijk)	1,00	0,63

Het effect op de luchtkwaliteit is blijkbaar erg beperkt.

7.1.4 Conclusies

Volgens Zondag (2007) kunnen volgende conclusies getrokken worden over Tovergroen:

Tovergroen heeft duidelijk positieve effecten op de afwikkeling van vrachtverkeer:

- *Grotere doorrijkans*
- *Minder roodlichtnegatie*
- *Kleinere kans om voor de stopstreep te worden gevangen.*
- *De nadelige effecten voor het overige verkeer zijn in verhouding gering of afwezig.*
- *De hier gebruikte detectiesystemen voor vrachtverkeer functioneren gebrekkig.*
- *Is eenmaal een vrachtwagen gedetecteerd en tovergroen toegekend, dan is de afhandeling verder correct.*
- *Tovergroen heeft een gering maar gunstig effect op de luchtkwaliteit.*
- *Het positief effect van Tovergroen zal tenminste tweemaal zo groot zijn bij goed functionerende detectie gecombineerd met een aantal software-aanpassingen.*

Tovergroen heeft duidelijk positieve effecten op de afwikkeling van vrachtverkeer. Deze conclusie is gegrond op een aantal meetbare effecten:

- *Tovergroen vermindert de roodlichtnegatie door zwaar verkeer. Het aantal forse roodlichtovertredingen door zwaar verkeer neemt met circa 30% af. Verwacht wordt dat het gunstige effect groter zal zijn bij een betrouwbaarder detectie.*
- *Tovergroen vergroot de doorrijkans voor vrachtwagens met 5 à 10% Het aandeel van de vrachtwagens dat met de waargenomen snelheid kan doorrijden neemt met 5 à 10% toe. Het percentage verschilt naar kruispunt en richting.*
- *Tovergroen vermindert het aantal vrachtwagens dat voor de stopstreep wordt gevangen met tenminste 20% Dit komt neer op een veertigtal vrachtwagens en bussen minder, per kruispunt en per etmaal, die als eerste voertuig voor de stopstreep tot stilstand komen.*

De nadelige effecten voor het overige verkeer zijn in verhouding gering of afwezig. Deze conclusie is gegrond op een aantal meetbare effecten:

- *Met Tovergroen nemen de gemiddelde verliestijden op alle richtingen met circa 5% toe. Voor de conflicten van de tovergroenrichtingen is dit een onvermijdelijk effect. Voor de tovergroenrichtingen zelf is dit een neveneffect van de hier toegepaste regelstructuur.*
- *Tovergroen heeft geen invloed op de roodlichtnegatie door overig (niet-vracht)verkeer.*

De detectiesystemen voor vrachtverkeer functioneren gebrekkig. Van de voertuigen die het systeem zou moeten detecteren wordt slechts 50 tot 90% werkelijk gedetecteerd. De score verschilt van dag tot dag en tussen de 4 systemen. De systemen zijn gevoelig voor weers- en lichtomstandigheden. De score bij duisternis is niet bekend maar naar verwachting slechter dan bij daglicht. De snelheidsclassificatie van de detectiesystemen werkt wel naar behoren.

Tovergroen als zodanig functioneert in grote lijnen naar behoren. Is eenmaal een vrachtwagen gedetecteerd en tovergroen toegekend, dan is de afhandeling verder correct. Het voertuig zal vrijwel altijd de stopstreep in groen passeren.

Het positief effect van Tovergroen zal tenminste tweemaal zo groot zijn bij goed functionerende detectie gecombineerd met een aantal software-aanpassingen. De grootste verbetering is te verwachten van een goed functionerend detectiesysteem. De effecten op het overige verkeer zullen daarbij minder dan evenredig toenemen.

Verder zijn op veel punten softwarematige verbeteringen mogelijk die leiden tot het vaker toekennen van Tovergroen, en het beter afstemmen van de (extra) groentijd op de behoefte. (Citaat)

Algemeen besluit:

Alhoewel Tovergroen voor een betere doorstroming van vrachtverkeer (sommige periodes) kan zorgen, is dit een verre van optimaal systeem. Problemen met goede detectie, software, ..., maken dat de hoofddoelstelling minder verbruik en minder emissies slechts een beperkte invulling krijgen.

Daarenboven is de winst voor de verkeersveiligheid –was wel geen doelstelling van het project- eerder beperkt. Enkel voor de hoofdrichting is er een lichte vermindering van de roodlichtrijders (alle voertuigen). Voor vrachtverkeer zijn er gemiddeld 2,4 roodlichtovertredingen minder door zwaar verkeer.

7.2 Travolution

AUDI heeft in samenwerking met de Technical University of Munich, Ingolstadt en GEVAS software Travolution ontwikkeld. De bedoeling is om de bestuurders te informeren over de juiste snelheid die ze moeten aanhouden om zonder stoppen kruispunten over te kunnen steken. Via communicatie (radiosignaal) kunnen de intelligente verkeerslichten melden hoe lang ze op rood staan en wordt dit doorgestuurd aan de ontvanger. In het voertuig wordt berekend met welke snelheid men moet rijden om het kruispunt bij groen te kunnen oversteken. Dit systeem kan in- of uitgeschakeld worden waardoor de bestuurder zelf kan beslissen om de gegevens te ontvangen en er rekening mee te houden.

Audi geeft aan dat wanneer een 10 % bestuurders Travolution hebben (en gebruiken) dit effect zal hebben om de files te verminderen.

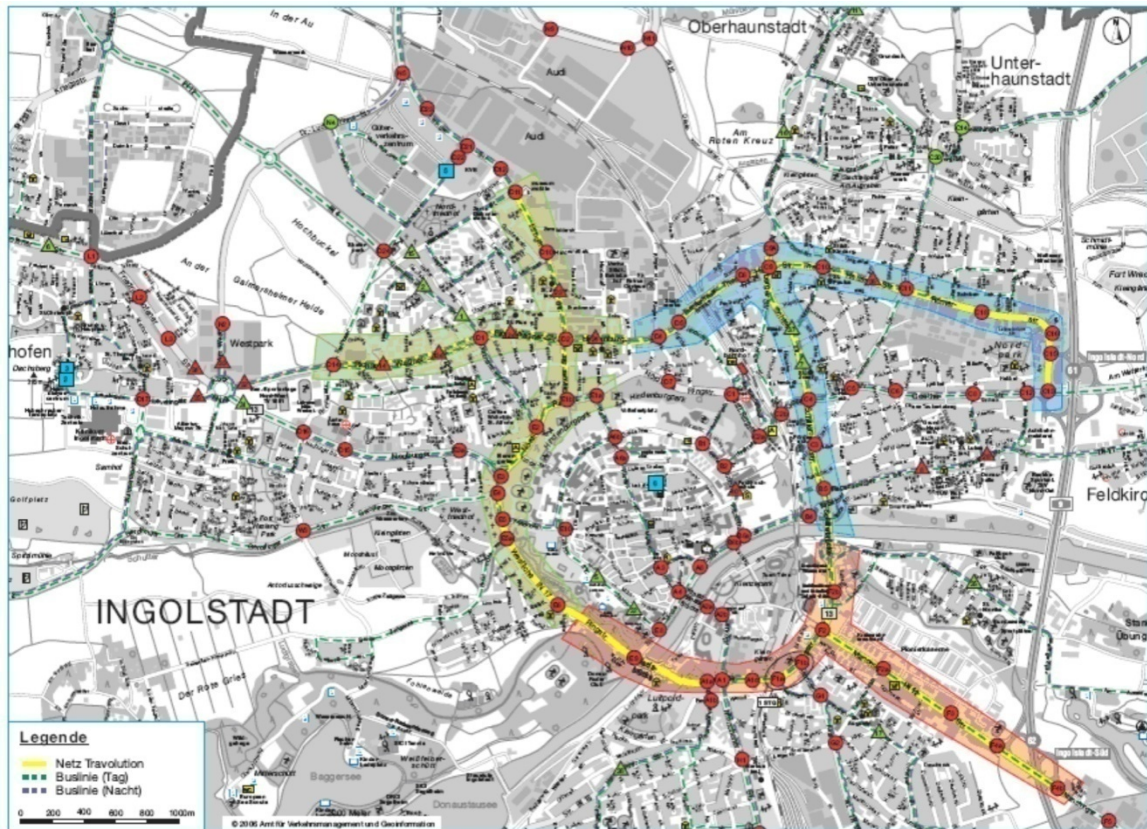


Figuur 8: opzet Travolution

In het testgebied -Ingolstadt- werden 46 VRI's uitgerust met software om de communicatie met voertuigen mogelijk te maken. Twee testvoertuigen -een Audi A5 en A6- werden gebruikt. Het project ¹⁰ was begroot op 1,2 miljoen €. In een volgende fase zal het project uitgebreid worden met 20 auto's en 50 bijkomende VRI's.

De bedoeling was om te onderzoeken hoe het optimaliseren van VRI's in steden de uitstoot en reistijd kon verminderen; tevens zou de stop-start van het verkeer kunnen verminderd worden. Het uiteindelijke doel was om stedelijke mobiliteit en veiligheid te verhogen. Bovendien krijgen bestuurders in Ingolstadt nog vaker nog actuelere verkeersinformatie.

¹⁰ Het project in Ingolstadt is een samenwerking tussen Audi, de Universiteit van München en GEVAS software. Het Travolution-project wordt ondersteund door het Beierse Ministerie van Economisch zaken.



Figuur 9: Wegennet Ingolstadt uitgerust met BALANCE

Verkeerslichten werden uitgerust met communicatiemodules die de groentijd voor het volgende verkeerslicht doorstuurden naar computer in de voertuigen. Via het Audi MMI infotainment systeem werden de bestuurders ingelicht welke snelheid ze dienen aan te houden om bij het volgende verkeerslicht het sein 'groen' te krijgen. Dat voorkomt onnodig stoppen (en optrekken) en dus extra brandstofverbruik en uitstoot.



In het verleden werd ook getracht om de communicatie tussen voertuigen en voertuig en infrastructuur uit te bouwen; dit zorgde voor vele problemen. In dit project (ITS International, 2008) wordt twee I2V (Infrastructure to Vehicle, zie ook Jerbi et al. (2007)) communicaties gebruikt: dynamische groene golven en de tijd van de roodfase; door dit laatste werd aan de bestuurders informatie gegeven hoe lang het licht op rood bleef waardoor men zou kunnen opteren om de motor af te zetten en hierdoor brandstof te besparen.

Alhoewel de VRI's in Inglostadt een goede optimaliseringbeoordeling had, werd met Urban Traffic Control (UTC) de wachttijd nog verminderd met 17 % (zowel naar basisscenario als naar het aantal stops).

Technologieën gebaseerd op IEEE 802.11 standaard voor Wireless Local Area Networks (WLANs) kunnen de criteria van korte reactietijd binnen hoge bandbreedte waarborgen. Bij de start werd 802.11B gebruikt terwijl later 802.11 p werd aangewend.

Er werd een "evolutionary" algoritme¹¹, de GALOP-online gebruikt. GALOP-online gebruikt het BALANCE-framework (het verkeerstrommodel) waarbij BALANCE (Balancing Adaptive NetworkControl method) het strategische en tactische niveau¹² beoogt. Het strategisch niveau wordt enkel ingeschakeld als een efficiënt interface om de objectieve functie te sturen.

¹¹ Een evolutionair algoritme is een type computerprogramma dat een evolutionair proces nabootst om oplossingen te vinden voor een bepaald complex (ontwerp)probleem. De computer slaat eerst een groot aantal willekeurige ontwerpen in het geheugen op. Die eerste, willekeurige ontwerpen zijn in het algemeen heel slechte oplossingen voor het betreffende probleem. Vervolgens kiest het programma de beste ontwerpen uit, kopieert ze een aantal keer, en brengt er hier en daar willekeurige wijzigingen in aan. Sommige ontwerpen zijn er waarschijnlijk slechter op geworden, maar een paar zijn wellicht iets verbeterd. Weer selecteert het programma de beste ontwerpen. Na heel veel rondes van muteren en selecteren kan zo een heel geavanceerde ontwerp worden geconstrueerd

¹² Een verkeerslichtenregeling gebruikt doorgaans drie niveaus: strategisch, tactisch en lokaal.



Het lijkt er sterk op dat de eerste prioriteit bij Travolution een vlot en zuiniger verkeer te krijgen en dat er veel minder ingezet is op veiligheid. Immers uit de ontvangen info kan men zonder moeite halen dat met wat sneller rijden men het groen/oranje kan voorbijrijden zonder te moeten stoppen. In dat geval komt niet alleen de onveiligheid ter sprake maar kunnen ook vragen gesteld worden bij de beoogde doorstroming en zuinig rijden.

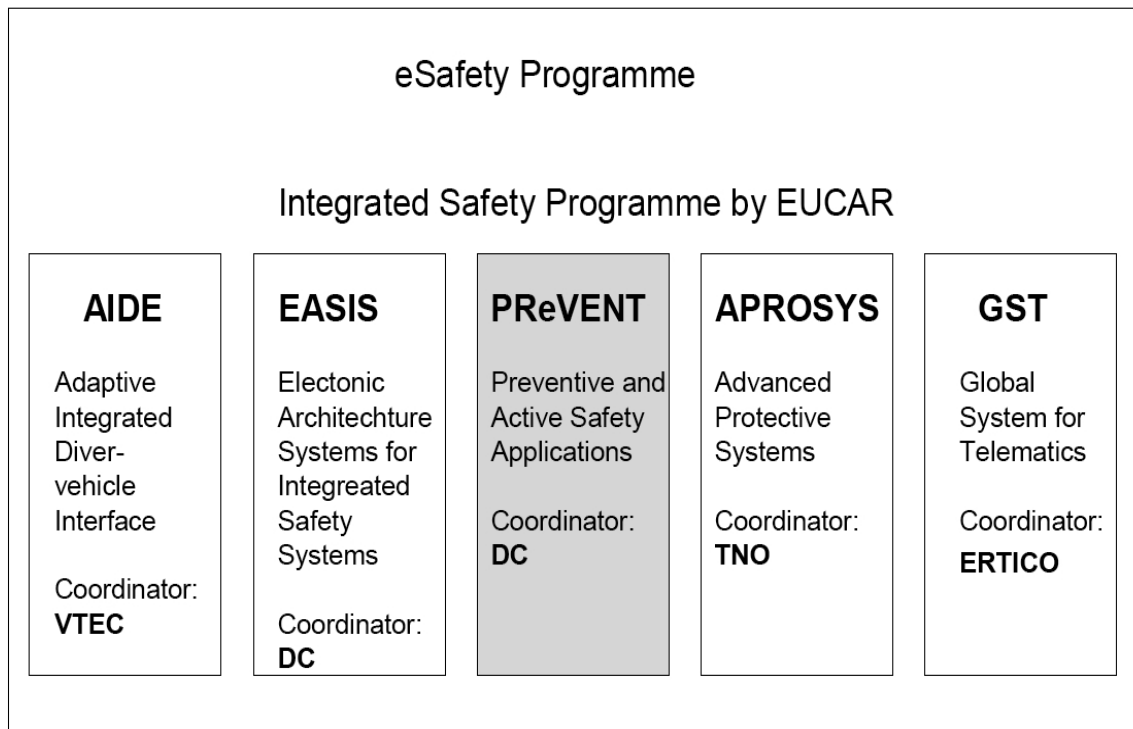
Het is tevens voor de hand liggend dat het systeem maar werkt in de mate dat alle bestuurders dit systeem hebben en respecteren. Immers naarmate te snelle wagens nog juist door het eerste groene/oranje licht glippen, is de kans reëel dat ze voor het volgende verkeerslicht wel stil staan en het normaal rijdend verkeer, doorgang belemmeren aan dat verkeerslicht. Het lijkt er sterk op dat dergelijke systemen niet alleen niet vrijwillig kunnen zijn maar tevens enkel informatie kunnen bevatten om vlot en veilig door het verkeerslicht te gaan. Informatie die kan geïnterpreteerd worden "als ik even sneller doorga, kan ik nog het verkeerslicht passeren", kunnen zowel de veiligheid als de doorstroming benadelen. De koppeling van dit snelheidsadvies aan een Intelligente Snelheids Aanpassing, kan dit probleem voor het grootste deel opvangen.

7.3 INTERSAFE

7.3.1 Situering

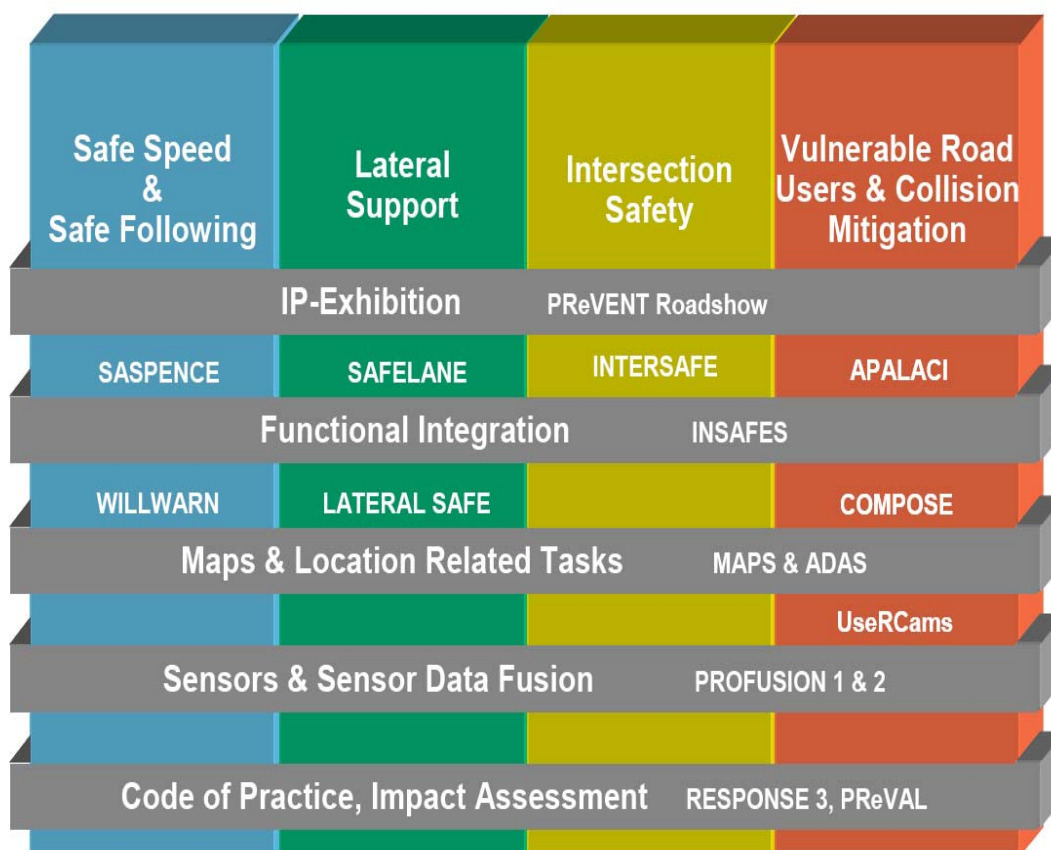
Het INTERSAFE project past binnen het Europese PReVENT. PReVENT is een project binnen het 6^{de} Framework Programma. In Figuur 10 wordt dit verduidelijkt.

6th Framework Programme



Figuur 10: situering PReVENT

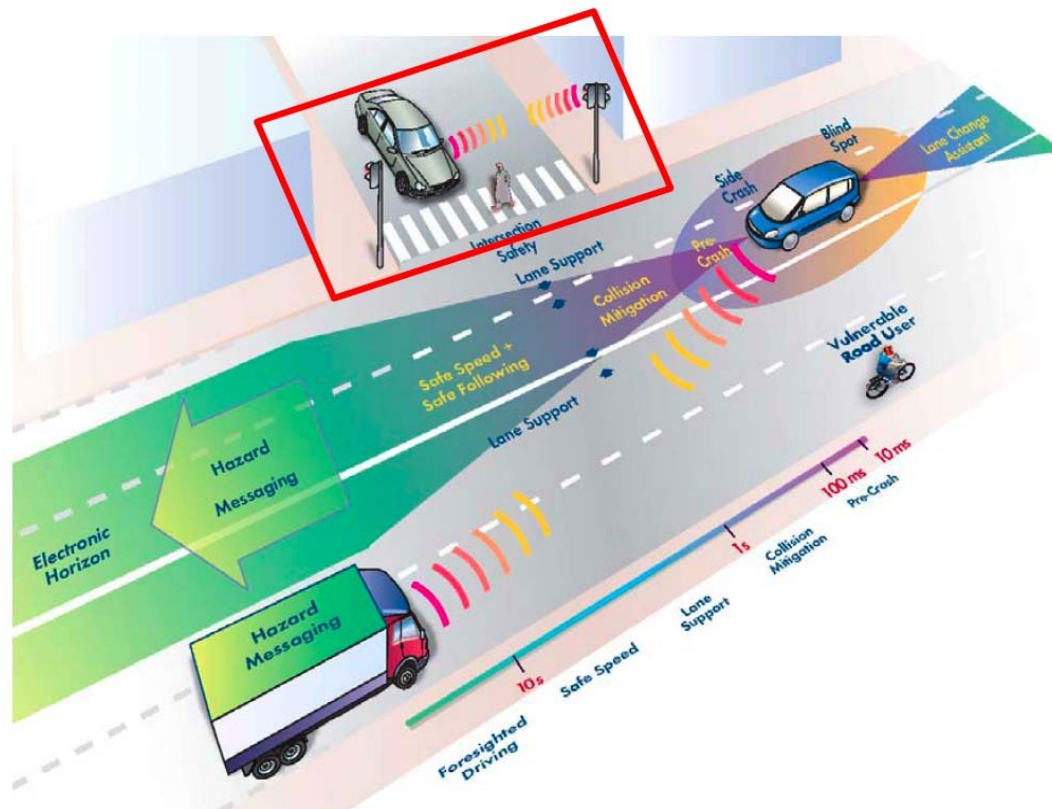
Ter situering worden in Figuur 11 de verschillende onderdelen van deze onderzoeken aangeduid. De indeling vertrekt van een aantal thema's: Safe Speed & Safe Following, Lateral Support, Intersection Safety, Vulnerable Road Users & Collision Mitigation. Daarbij wordt aangeduid welke specifieke projecten voor deze thema's instaan.



Figuur 11: structuur PReVENT

In het steunpuntrapport ITS en Verkeersveiligheid. Intelligente Transport Systemen (De Mol et al., 2008) vindt men een uitgebreide beschrijving van PReVENT.

In onderstaande Figuur 12 wordt de verschillende onderdelen van PReVENT op grond van de specifieke verkeersveiligheidsproblemen. Het onderdeel INTERSAFE (Intersection) is bijkomend extra aangeduid.



Figuur 12: Toepassingsgebied van de verschillende onderdelen van PReVENT

7.3.2 Beschrijving

Zoals aangeduid in sectie 2.5 vormen kruispunten een belangrijk onveiligheidselement en is het beveiligen van kruispunten –in casu VRI’s- een belangrijk onderdeel om de verkeersveiligheidsdoelstellingen te halen.

In het project werkten autoconstructeurs (BMW, VW, PSA en Renault), toeleveranciers (TRW, Conekt en IBEO), kleine bedrijven en onderzoeksinstituten (INREA, ika) samen. In dit rapport wordt slechts één onderdeel –namelijk VRI’s- beschreven terwijl in het Intersection safety, ook andere aspecten van kruispunten¹³ worden behandeld.

De bedoeling van Intersection Safety (op VRI’s) is om de bestuurder te informeren en/of waarschuwen voor verkeerslichten; deze informatie/waarschuwing is zo opgesteld dat de bestuurder kennis heeft van de tijd en de aangewezen snelheid om het kruispunt veilig te kruisen of veilig af te slaan (ingeval van aparte groentijd voor afslagbewegingen). Door deze informatie/waarschuwing hoopt men conflicten ter hoogte van kruispunten te vermijden. Deze conflicten kunnen ontstaan uit verstrooidheid (niet opmerken van het verkeerslicht, rood of groen licht), onaangepast rijgedrag in functie van de te verwachten rood of groencyclus of onvoldoende zicht op de verkeerslichteninstallatie.

Uiteindelijk wordt verwacht dat door deze informatie/waarschuwing de bestuurder het rijgedrag aanpast waardoor de kans op conflicten wordt verminderd. Het aanpassen van dit rijgedrag slaat op verminderen snelheid; dit kan langzaam gebeuren of kan eerder naar hevig remmen gaan indien niet tijdig op de informatie/waarschuwing wordt ingegaan.

¹³ Links- en rechtsaf bewegingen op klassieke kruispunten, verlenen voorrang op kruisende wegen, recht doorgaande fietsers, bromfietsers, voetgangers, ... zie hiervoor tabel ...: verdeling van ongevaltypologieën

Met betrekking tot de vrijwilligheid van het systeem blijft dit project nogal vaag. Uit de demonstraties (8-22 September 2007 IP PREVENT EXHIBITION: PREVENT IN ACTION! TECHNOLOGIES FOR SAFER ROAD TRAFFIC" Versailles Frankrijk) bleek dat de bestuurder de info/waarschuwing kon negeren en zelf een nog meer ongewenst rijgedrag –sneller rijden om toch nog "tijdig" het kruispunt te bereiken- kon ontwikkelen. Men vermeldde bij deze demonstratie dan wel dat dit niet de bedoeling is maar gaf wel toe dat men een dergelijke conclusie uit de informatie kon halen.

7.3.3 Werking

Door middel van het ontwikkelen van geavanceerde sensorsystemen en algoritmes kan het voertuig exact gelokaliseerd worden tegenover ander weggebruikers, wordt de route ervan voorspeld en gebeurt de communicatie met infrastructuur.

Om dit mogelijk te maken werden volgende stappen gevolgd:

- Een waarschuwingssysteem voor kruispunten werd in een demonstratievoertuig (en) gebouwd; dit is gebaseerd op de exacte locatie van de andere weggebruikers, het voorspellen van de route ervan en communicatie met het verkeerslicht.
- Het ontwikkelen van een geavanceerd systeem voor veiligheid op de kruispunten via een dynamische simulator omgeving was noodzakelijk; de bedoeling is om op deze wijze toekomstige verkeersveiligheidtoepassingen en sensoreisen te kunnen bepalen.

Vermits op kruispunten verschillende weggebruikers zich zowel in tijd als in ruimte kort bij elkaar zijn, hoeft het nauwelijks vermeld te worden dat een dergelijk verkeersveiligheidsysteem zeer betrouwbaar en robuust moet zijn.

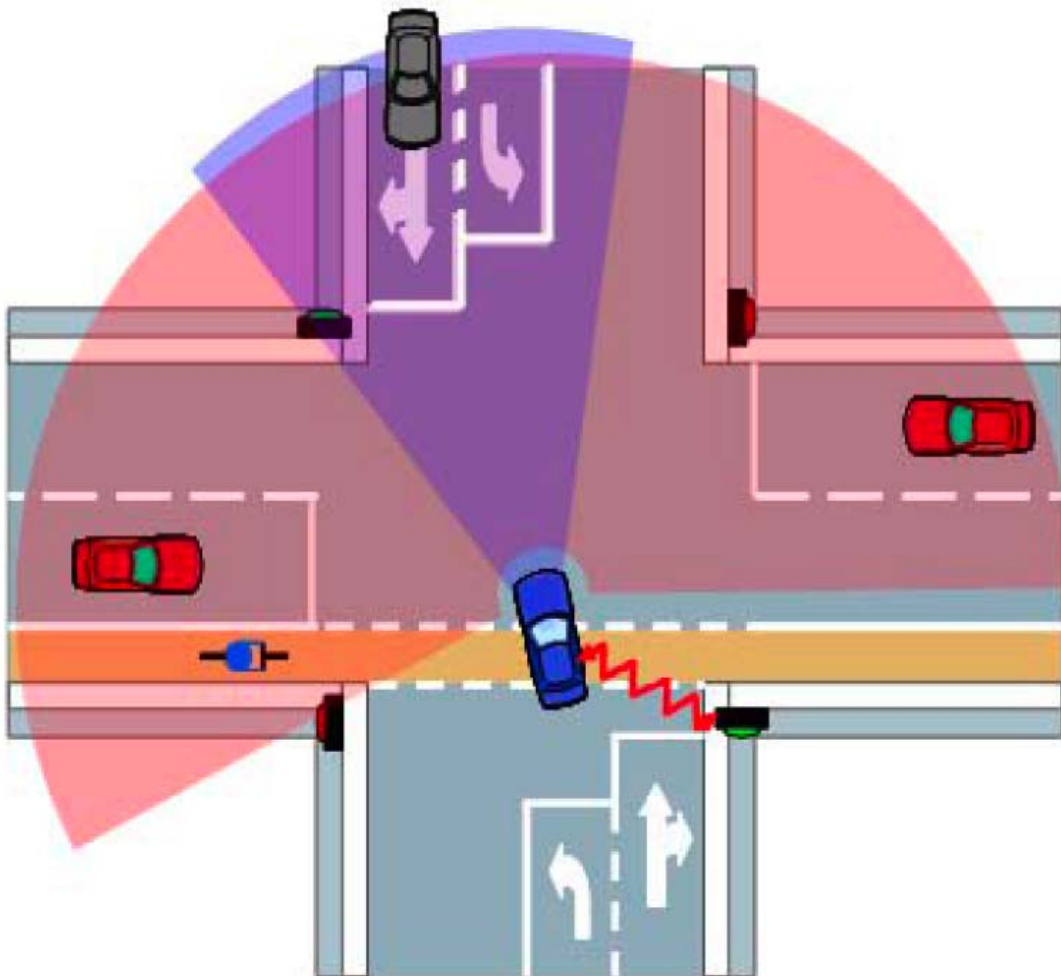
Zoals reeds gesteld werd naast twee demonstratievoertuigen, een laser scanner systeem en sensor gebruikt. Daarnaast werden een aantal subsystemen gebruikt:

- Voertuig-Infrastructuur Communicatie (V2I) om V2I om bidirectionele communicatie tussen het voertuig en verkeerslichten mogelijk te maken.
- Accurate relatieve lokalisatie met behulp van een videocamerasysteem maakte het mogelijk om een nieuwe benadering waarin zowel de laterale en longitudinale positie van de functies (kruispunt) werden gebruikt, vast te leggen. Line matching en het bijhouden van algoritmen werden gebruikt om metingen te vergelijken met een gedetailleerde functieniveau (kaart) van de kruispuntenmarkering,; op deze wijze kon de relatieve positie van het voertuig op het kruispunt worden bepaald.
- Relatieve lokalisatie op een kruispunt: de relatieve locatie van het voertuig werd met behulp van een laserscanner en een sensor (vision sensor) bepaald. Dit gebeurde door het vergelijken van de huidige metingen met oriëntatiepunten.
- Detecteren, lokalisatie en het soort weggebruikers waren gebaseerd op de situering van het voertuig; daarbij werd de geometrie van het kruispunt opgeslagen en werd op de achtergrond een eliminatieproces uitgevoerd.
- Situatiesanalyse en risicobeoordeling voor Intersection Driver Warning System wordt gebruikt om de vertegenwoordiging van het complex rijgedrag op kruisingen uitsluitend in termen van een enkele geometrische entiteiten te kennen. Dit vergemakkelijkt de berekening van de mogelijke trajecten, en de bepaling van mogelijke conflicten in de kruising.
- Risicobeoordeling op basis van grafieken. Hoogrisico situaties op kruispunten zijn een combinatie van meerdere factoren die zeer moeilijk te beoordelen zijn. De gebruikte aanpak beschouwd het risico als een geometrische object ingebed in een ruimte-tijd verzamelleiding. Om dit te bereiken werd een nieuwe

informatiecodering procedure ontwikkeld om op deze wijze de intrinsieke relaties tussen deze objecten te kunnen vaststellen.

- Situatie en risico-evaluatie voor een Intersection Active Safety System gebruikt ongevalgegevens en typisch linksafslaggedrag van de bestuurders. Het ontwikkelde systeem ontwikkelde profiteerde van enkele typische parameters die altijd een onderdeel van dit manoeuvre zijn.

Op basis hiervan werd het INTERSAFE concept –dat ruimer is dan de veiligheid op een VRI- vastgelegd (zie Figuur 13)



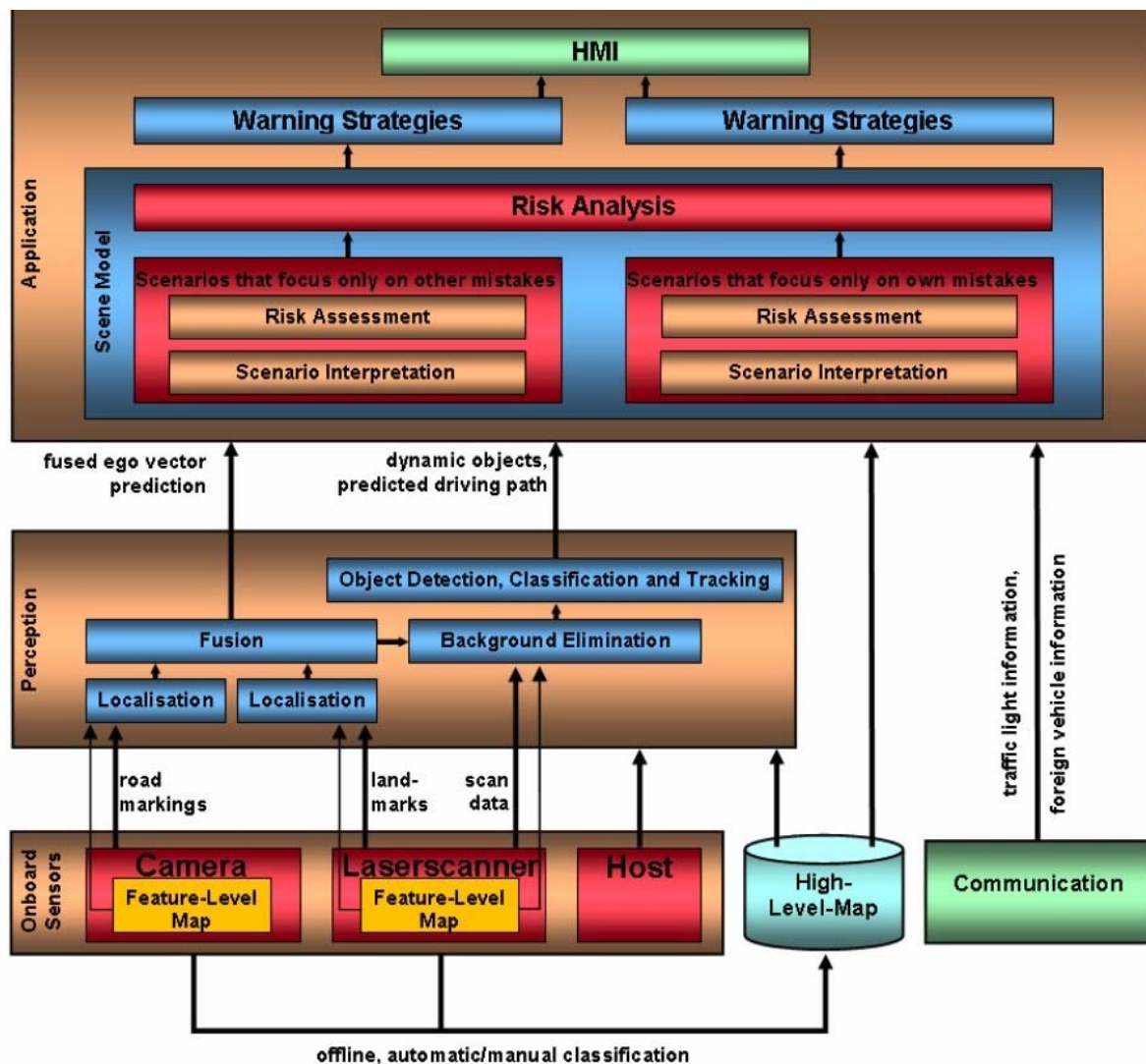
Figuur 13: INTERSAFE concept

In de demonstratiesystemen werd gekozen voor een visuele en akoestische waarschuwing; daarbij werd een snelheidsadvies gegeven. Dit snelheidsadvies was bedoeld om een comfortabel rijgedrag mogelijk te maken; daarenboven had dit snelheidsadvies een ecologische functie: door onnodige snelheid te vermijden, kan een brandstofbesparing (vermijden snel rijden om dan bruusk te moeten remmen) gerealiseerd worden. In het rapport (PReVENT INTERSAFE, 2007) wordt vermeld dat de bijkomende informatie (zowel aanwezigheid VRI als snelheid) de bestuurder in staat stelt om vooraf te weten welke verkeerssituatie er kan verwacht worden. Op deze wijze kan deze info/waarschuwing resulteren in minder kritische situaties en betere verkeersdoorstroming.

7.3.4 Architectuur

Vermits dit onderdeel past in een groter onderzoeksproject werd gepoogd om verschillende architectuurelementen van verschillende onderzoeksdelen te combineren. Immers een aantal vereisten –ondermeer het detecteren van andere weggebruikers, infrastructuur, .V2I communicatie,...- zijn ook in de andere onderzoeksprojecten aanwezig.

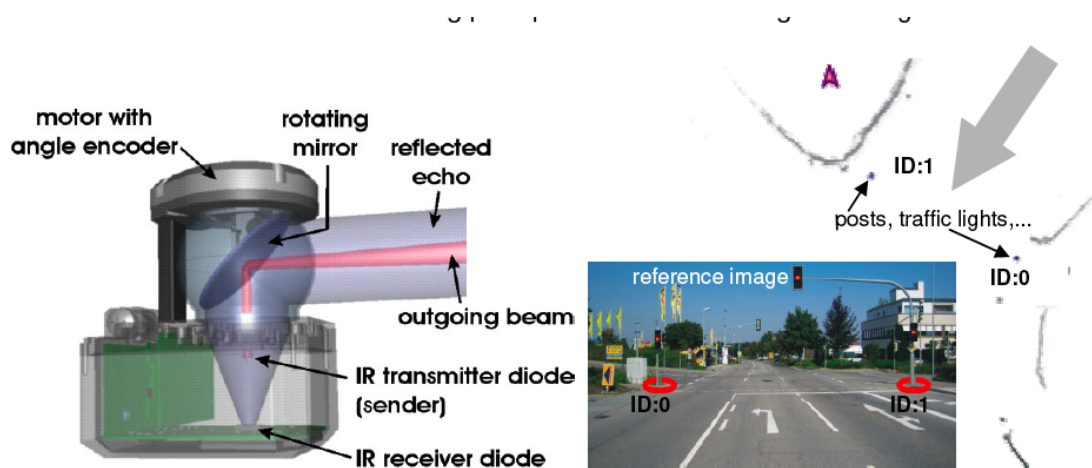
De onderstaande figuur geeft de architectuur aan die voor het Intersection Driver Warning System in de VW Phaeton demonstrator werd aangewend.



Figuur 14: B-ISS architectuur

7.3.5 Sensoren

De door IBEO ontwikkelde sensor detecteert de verschillende weggebruikers en geeft ook een relatieve lokalisering op basis van landschapskenmerken (in stedelijk gebied is dit voornamelijk infrastructuurkenmerken).



Figuur 15: Laserscanner en FLM (Feature Level Map)

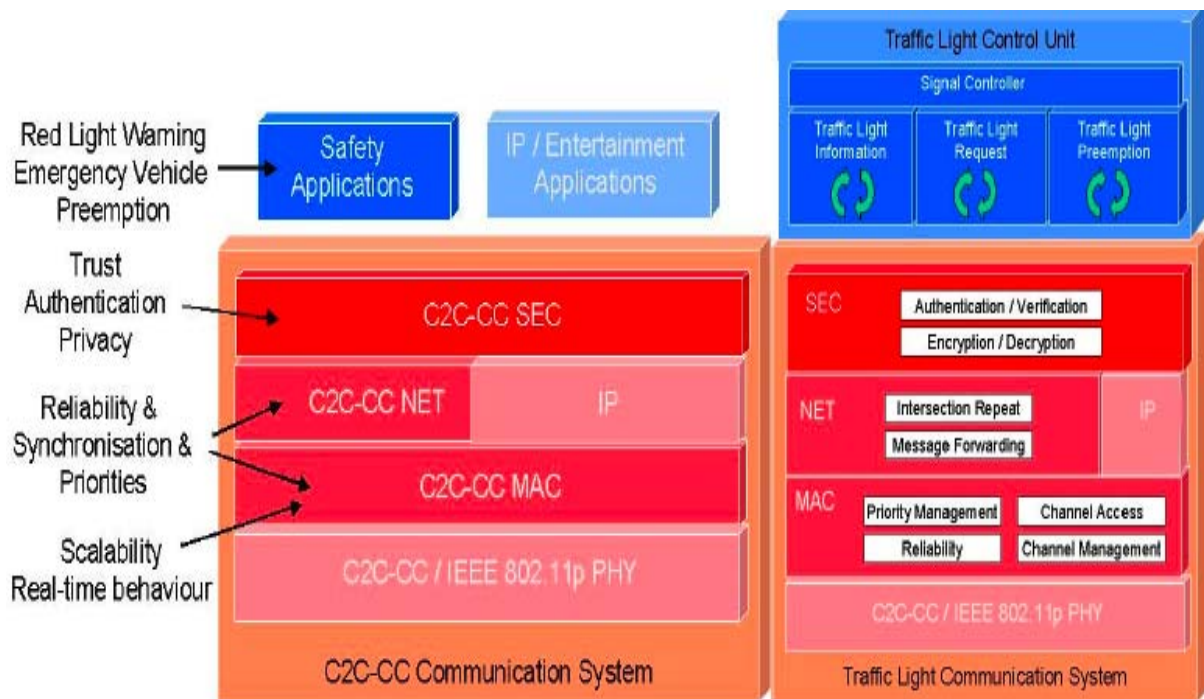
De sensor diende een groot detectiegebied rond het voorste deel van het voertuig te bestrijken. Hiertoe werden twee laserscanners geïntegreerd om op deze wijze het volledige horizontale gebied te bevatten. Weggebruikers werden door het typische voorkomen met behulp van geometrische gegevens herkend. In onderstaande tabel worden de belangrijkste kenmerken gegeven:

Description	Value
Accuracy	$\pm 0,1$ m
Range	0,3 ... 200 m
Horizontal field of view	≤ 240 degree

Tabel 8: Specificatie van het Laserscanner systeem

Er werd een video camera gebruikt van een LDW-systeem (Lane Departure Warning) om de relatieve laterale positie van de wegkenmerken te meten.

Naast de sensor en de video werd een communicatiemodule gebruikt. De huidige technologische basis is IEEE 802.11b met DSRC specifieke aanpassingen. De communicatiearchitectuur voor de Intersafe verkeerslicht' communicatie wordt weergegeven in onderstaande Figuur 16. Communicatie werkte op het moment van de demonstratie in de 2,4 GHz-band, maar het was de bedoeling van de C2CCC om een frequentie te bekomen die exclusief voor verkeersveiligheidtoepassingen is (5,9 GHz band IEEE802.11p). Men is hierin geslaagd, op 5 augustus 2008 werd door de EC 30 MHz spectrum in de 5.9 GHz band gereserveerd voor ITS applicaties¹⁴.



Figuur 16: Communication architectuur

7.3.6 Human Machine Interface

In verkeerssituatie zoals bij VRI's is het enorm belangrijk om de bestuurder eenduidig, snel en zonder afleiding, informatie over te maken. Daarbij werd rekening gehouden met de gebruikte checklist in Response (PREVENT RESPONSE 3, 2006). Vermits op dat ogenblik sommige vragen nog niet konden beantwoord worden, werd gekozen voor waarschuwingen of aanbevelingen naar het gewenste rijgedrag (snelheid, remmen).

Vermits het voordeel van dit ADAS (advanced driver assistance systems) om de bestuurder tijdig te waarschuwen voor potentieel gevaarlijke situaties (kans op botsing, wanneer men niet tijdig reageert op de verkeerslichten). Het HMI ontwikkeld binnen Intersafe werd opgebouwd op basis van een risicobeoordeling van de huidige rijsituatie. Op deze wijze wordt de informatie/waarschuwing gebruikt om de tijd voor de bestuurder om op adequate wijze te reageren te verhogen en zodoende ofwel een tijdig afremmen of noodstop mogelijk te maken.

Alhoewel de informatie kan worden gegeven via bv. het navigatiescherm, lijkt het aanvullend noodzakelijk een waarschuwing te geven in een andere passende displays; de bedoeling is dat men de waarschuwing of info onmiddellijk ziet en begrijpt.

Een hiertoe veel gebruikte techniek is het weergeven van waarschuwingen die via een voortgangsbalk die op een stijgend of dalend risico duiden; mogelijk kunnen ook bijkomend symbolen gebruikt worden.

In onderstaande figuur wordt hier van een voorbeeld –dat toegepast werd in de demovoertuigen- getoond.



Figuur 17: HMI graphics in head-up en navigatie display

Samen met deze visuele waarschuwing was een akoestische waarschuwing nodig om de aandacht van de bestuurder te trekken op de informatie/waarschuwing. Zowel een geluid als een waarschuwingsbevel kan hiertoe gebruikt worden. Een uitiem akoestisch alarm kan worden voorzien indien de vorige twee –visueel en akoestisch- niet de gewenste verandering in het rijgedrag opleveren.

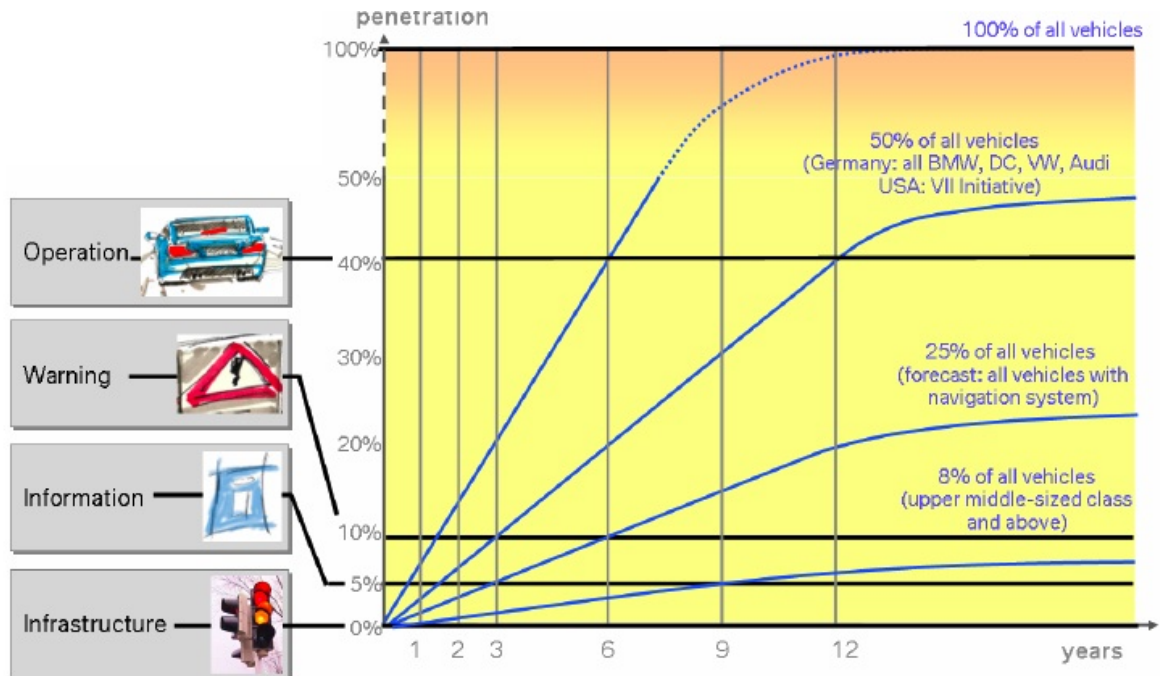
7.3.7 Marktintroductie

In het project werden ook marktscenario's voorzien. In het INTERSAFE Intersection project is men erg voorzichtig naar implementatiescenario's. Grotendeels is dit ingegeven door het bestaan van een aantal niet beantwoorde vragen. Daarbij spelen zowel technische als beleidsaspecten een rol. Het beschikbaar zijn van de eerste coöperatieve IST-applicatie zou daarbij een belangrijke rol spelen; bij het beëindigen van het project (2006) werd verwacht dat binnen vijf jaar zulke applicaties beschikbaar zouden zijn.

Deze schatting lijkt de dag van vandaag eerder optimistisch. Ontwikkeling van zulke communicatie technologieën is nog volop aan de gang, bv in het CVIS project dat pas afloopt begin 2010. Deze ontwikkelingen gebeuren op kleine schaal in een gecontroleerde laboratorium omgeving. Een volgende stap in de ontwikkeling zal het testen zijn van de ontwikkelde technologie in zogenaamde Field Operational Tests (FOTs). Einde 2009 zal de EU een call voor FP7 projecten lanceren toegespitst op deze FOTs (call ICT-2009.6.2: ICT for Mobility of the Future). Verwacht wordt dat deze projecten enkele jaren zullen duren, en de technologie pas voldoende getest en verder ontwikkeld zal zijn tegen 2013-2014. En dan moeten de eerste stappen van een echte marktintroductie nog ondernomen worden.

Een belangrijk te overkomen obstakel voor coöperatieve ITS systemen gebaseerd op voertuig-voertuig en voertuig-infrastructuur communicatie is het probleem van de penetratiegraad. Een groot aantal coöperatieve applicaties (bv filestaart waarschuwing) zal pas correct kunnen functioneren wanneer voldoende voertuigen uitgerust zijn met deze systemen. Maar wie zal er deze systemen aankopen als deze op dat moment nog geen nut hebben? Hierbij zouden intelligente verkeersregelinstanties een belangrijke rol kunnen spelen. Dit is namelijk één van de weinige applicaties waarbij de penetratiegraad van minder belang is. De bestuurder van een uitgerust voertuig zal de informatie van het verkeerslicht kunnen ontvangen, onafhankelijk van de eventuele aanwezigheid van deze systemen in andere voertuigen. Stimuleren van deze applicaties zou dus voor een voldoende kritieke massa kunnen zorgen om later andere coöperatieve applicaties mogelijk te maken.

In onderstaande Tabel 9 wordt de tijdshorizon voor C2X (= C, CCC, I, ...) voor verkeersveiligheidtoepassingen vermeld zoals voorzien door PReVENT. Zoals hierboven vermeld geloven de auteurs van dit rapport in de trends zoals te zien op de figuur, maar moet er rekening gehouden worden met de mogelijkheid dat deze trends nog een aantal jaren langer dan voorzien op zich zullen laten wachten.

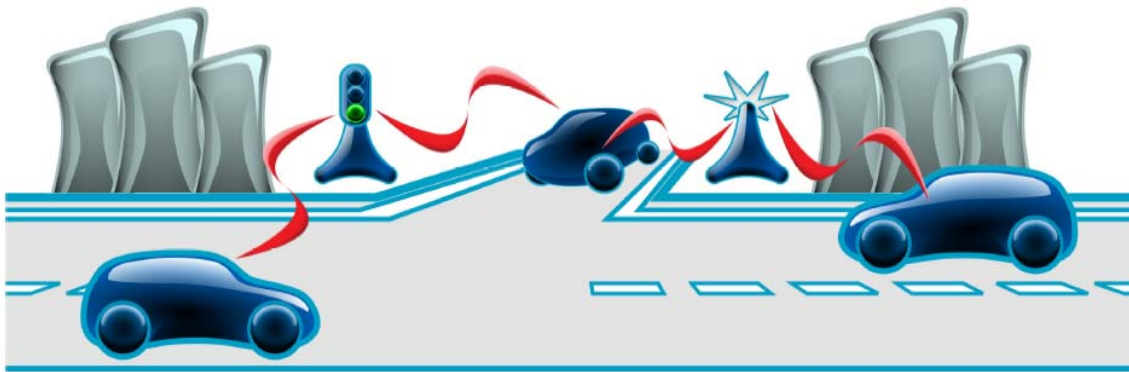


Tabel 9: Tijdshorizon voor C2X-gebaseerde veiligheidsapplicaties

7.4 IRIS

7.4.1 Situering

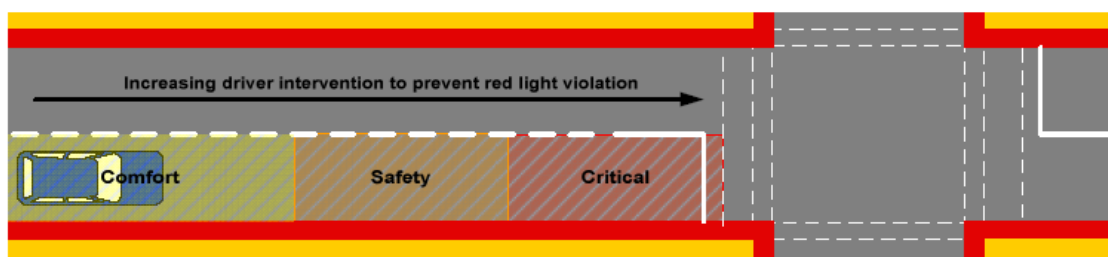
Het Intelligent Cooperative Intersection Safety system (IRIS) maakt deel uit van het Europese onderzoeksproject SAFESPOT. Dit is een geïntegreerd Europees project uit het 6^e Framework Program waarin 52 partners uit verschillende disciplines samenwerken met het doel de veiligheidsmarge van de bestuurder te vergroten in zowel tijd als ruimte. IRIS is een roadside applicatie die het aantal ongelukken aan gecontroleerde en niet-gecontroleerde kruispunten tracht te verminderen. Daarvoor gebruikt IRIS voertuig-infrastructuur communicatie om de bewegingen van alle individuele voertuigen te analyseren, en laserscanners om zwakke weggebruikers te identificeren. Het basisidee achter IRIS is dat het systeem gebaseerd op deze inputs gevaarlijke situaties op tijd kan inschatten en de nodige maatregelen kan nemen om ongelukken te vermijden, zoals het aanpassen van de schakeltijd van de lichten of het sturen van waarschuwing via draadloze communicatie naar human-machine interfaces geïnstalleerd in de voertuigen (Vreeswijk et al., 2008b).



Figuur 18: Impressie van een IRIS systeem

Het IRIS systeem richt zich tot drie scenario's die verantwoordelijk zijn voor een significant aandeel van de ongevallen op kruispunten: roodlichtrijden, links afslaan (conflict met aankomend verkeer) en rechts afslaan (conflict met zwakke weggebruikers). Het IRIS systeem is niet de eerste ITS gebaseerde poging om het aantal ongevallen aan kruispunten te verminderen, zoals reeds beschreven in sectie 7.3 had het INTERSAFE subproject binnen PReVENT een gelijkaardig doel. In dit project werd gebruik gemaakt van verschillende soorten voertuig sensors om voertuigbewegingen te analyseren en bestuurders te waarschuwen voor mogelijke conflicten. Het grote verschil tussen het INTERSAFE en IRIS systeem is dat INTERSAFE beschouwd kan worden als een voertuiggebaseerde applicatie, en IRIS als een infrastructuurgebaseerde.

Een zeer belangrijk aspect bij het ontwikkelen van een kruispunt veiligheidssysteem is timing. De uitdaging is ervoor te zorgen dat de bestuurder niet overladen en verveeld wordt met berichten die niet nuttig zijn of op het verkeerde moment worden aangereikt. Langs de andere kant moet een waarschuwing tijdig aan de bestuurder gegeven worden om nog veilig te kunnen reageren en een ongeluk te vermijden. Daarom gebruikt IRIS hetzelfde Safety Margin Concept welke ontworpen en ontwikkeld werd binnen SAFESPOT. Dit concept onderscheidt drie fasen waarin interventie van de bestuurder steeds belangrijker wordt om een ongeluk te vermijden (zie Figuur 19)



Figuur 19: Safety Margin Concept

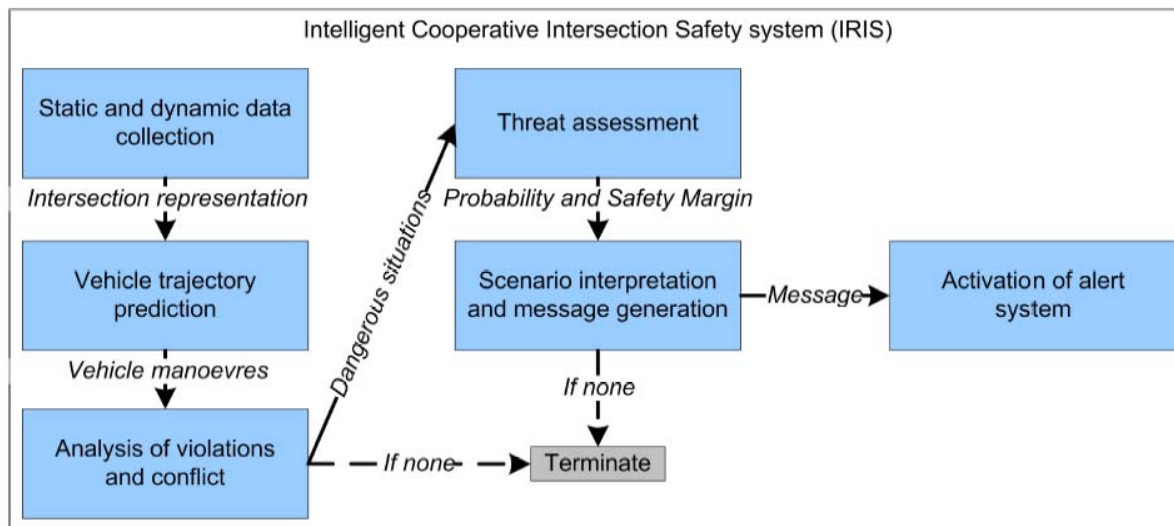
7.4.2 Werking

IRIS beveiligd stedelijke met verkeerslichten uitgeruste kruispunten door het volgen van alle individuele bewegingen van weggebruikers (bestuurders, voetgangers en fietsers). Dit kan beschouwd worden als een microscopische procedure. Door een analyse van die

individuele beweging tracht IRIS gevaarlijke situaties zo vroeg mogelijk te identificeren om zo effectief mogelijk te kunnen ingrijpen of waarschuwen. De applicatie kan beschouwd worden als een functionele uitbreiding van een verkeersregelinstallatie. Deze zendt niet alleen waarschuwingen naar de bestuurders, maar kan ook indien nodig de lokale verkeersregeling beïnvloeden om ongelukken te voorkomen.

In Figuur 20 is de IRIS procedure weergegeven die periodiek in een lus wordt uitgevoerd. Deze lus bestaat uit de volgende vijf opeenvolgende onderdelen:

- **Ontvangen LDM data:** alle statische data (bv de geometrie van het kruispunt) wordt eenmaal uitgelezen uit de Local Dynamic Map databank wanneer de procedure opgestart wordt, terwijl de dynamische data (detectie waarden, informatie van de voertuigen, ...) regelmatig binnen bepaalde tijdsperiodes wordt uitgelezen. De tijdsperiodes kunnen variëren afhankelijk van het data type.
- **Voorspelling trajecten:** de voorspelling van de trajecten van de verschillende voertuigen is gebaseerd op zogenaamde "reference tracks". Deze kunnen beschouwd worden als de statische voorstelling van een typische rijlijn van een voertuig dat het kruispunt passeert. Om deze te kunnen gebruiken in voorspellingen wordt aan deze statische data een waarschijnlijkheidsdistributie gekoppeld samen met een tijdsparameter voorstelling van de beweging van het voertuig. De voorspellingsschattingen voor voertuigen gaan er in het algemeen van uit dat alle manoeuvres zo redelijk mogelijk zijn en de verkeersregels naleven.
- **Situatie analyse:** alle mogelijke conflict punten van voertuigbewegingen worden berekend samen met probabiliteiten door het onderzoeken van (1) alle combinaties van voertuigtrajecten, (2) voertuigtrajecten en stop lijnen, (3) voertuigtrajecten en oversteekplaatsen voor zwakke weggebruikers rekening houdende met de huidige staat van de verkeerslichten. Resultaat is een lijst met gevaarlijke situaties samen met verwachte tijdspunten en de waarschijnlijkheid dat ze zullen voorkomen.
- **Bepalen van maatregelen:** om een maatregel te selecteren of vast te leggen moeten twee belangrijke zaken in rekening gebracht worden: (1) de waarschijnlijkheid dat een voertuig betrokken is in een bepaalde gevaarlijke situatie, en (2) de resterende tijd tot de aanrijding om de safety margin area vast te leggen. Afhankelijk van de resterende tijd kan de verzameling van mogelijke interventies beperkt zijn. Daarboven is de overgang tussen de verschillende fasen in de safety margin area waarschijnlijk verschillend voor elk scenario. Zo zal een afslaand voertuig snelheid minderen bij het naderen van een kruispunt in vergelijking met een rechtdoor rijdend voertuig. Dus vereist elk scenario een andere beslissing van IRIS, wat kan resulteren in verschillende verzamelingen van berichten om aanrijdingen te voorkomen.
- **Aansturen waarschuwingssystemen:** de laatste actie in de keten van gebeurtenissen is het aansturen van de overeenstemmende waarschuwing subsystemen of toestellen. In principe zijn twee klassen van maatregelen mogelijk (en uitgevoerd): (1) waarschuwingsberichten worden naar de bestuurders verzonden gebruik makende van het Vehicular Ad Hoc Network (VANET), en (2) naar de lokale verkeerslichten controller zodat deze de roodtijden van de relevante lichten kan aanpassen.

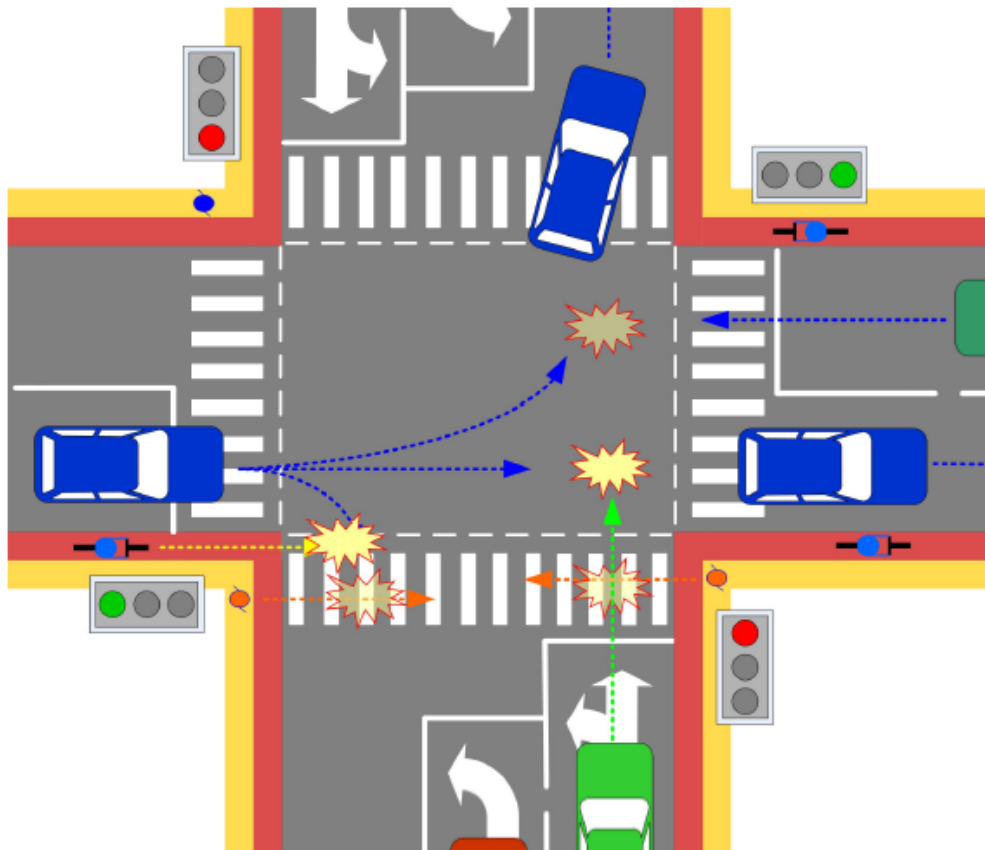


Figuur 20: activiteitslus IRIS systeem

7.4.3 Experimenten rij simulator

In het project worden experimenten in een rij simulator uitgevoerd ter ondersteuning van de implementatieactiviteiten en om de applicatie en zijn concepten te valideren. Dankzij simulatie is het mogelijk om een meer systematische en uitgebreide analyse van applicaties en hun mogelijke varianten te maken. Vroeg tijdens het opstellen van de specificaties en de ontwikkeling kan simulatie nuttig zijn om de timing (bv het safety margin concept) van de applicaties te bestuderen, optimale parameterinstellingen af te leiden en de potentiële impact van een toepassing in te schatten indien validatie in de echte rijomgeving niet mogelijk is. Wat ook zeker niet onbelangrijk is, is het feit dat simulaties zeer geschikt zijn voor het geven van duidelijke en begrijpbare demonstraties van toepassingen en hun gebruik. Succesvolle introductie van een geavanceerd coöperatief bestuurdersondersteuningsysteem zoals IRIS is sterk afhankelijk van een slimme configuratie die goed de complexiteit van de situaties waarvoor hij ontworpen is kan omvatten. Met dit doel in het achterhoofd werden een aantal eerste experimenten uitgevoerd om het IRIS concept in te schatten in verschillende omstandigheden en om meer te leren over gebruikersacceptatie, bruikbaarheid en bijdrage van het systeem (Vreeswijk, 2008b).

Het experiment bestond uit drie scenario's: (1) een waarschuwing voor een normale wagen die door het rood licht rijdt, (2) een waarschuwing voor conflicten met een scooter tijdens het rechts afslaan (waarbij de scooter rechtdoor rijdt en het pad kruist van het afslaan voertuig), en (3) een waarschuwing voor een prioritair voertuig dat door het rood rijdt (de roodrijder kwam steeds van rechts). Deze scenario's worden afgebeeld in Figuur 21. Het gesimuleerde netwerk bestond uit 6 opeenvolgende kruispunten in een stedelijke omgeving met een snelheidslimiet van 50 km/u. De deelnemers werd opgedragen om bij de laatste twee kruispunten rechtsaf te slaan. De eerste vier kruispunten werden gebruikt voor scenario 1 en 3, de laatste twee voor scenario 2. Voor meer informatie betreffende de gekozen parameters voor de verschillende scenario's, gebruikte waarschuwingsiconen en technische details van de gebruikte rij simulator verwijzen we de lezer naar de publicatie van Vreeswijk (2008b).



Figuur 21: Kruispuntscenario's rij simulator

In totaal namen 12 personen deel aan het experiment, waarbij ze elk 5 keer het traject gereden hebben, waarin steeds andere situaties werden gesimuleerd. De data van de rij simulator werd gelogd en er werd aan de deelnemers ook gevraagd om een aantal meerkeuzevragen in te vullen over hoe zij het systeem ervoeren. Gebruik makende van deze informatie konden de onderzoekers volgende resultaten publiceren (meer details te vinden in Vreeswijk (2008b)):

- **Verskil tussen roodrijdende politiewagen en normale wagen:** beide voertuigen reden steeds van rechts door het rood licht, aan dezelfde snelheid en volgens dezelfde timing, en toch werden subjectieve verschillen tussen beiden vastgesteld. Zo werd een roodrijdende normale wagen door de deelnemers als kritieker beschouwd als een roodrijdende politiewagen. Ook werd vastgesteld dat de deelnemers harder op de rem gingen voor een gewone wagen dan voor een politiewagen (ook al naderden die het kruispunt aan dezelfde snelheid). Anderzijds meldten de deelnemers dat naar hun gevoel de waarschuwing over het politievoertuig te laat werd gegeven, terwijl deze op exact hetzelfde moment werd gegeven als bij het gewone voertuig. Hieruit kan worden besloten dat een waarschuwing voor een prioritair voertuig vroeger moet gegeven worden dan een waarschuwing voor een gewone roodrijder.
- **Verskil in snelheid:** een waarschuwing gegenereerd voor een roodrijder aan 30 km/u had volgens de deelnemers een hoger positief effect op hun verkeersveiligheid dan een waarschuwing voor een roodrijder die 60 km/u rijdt. Hierbij werden de roodrijdende voertuigen zo geprogrammeerd dat deze de bestuurder op hetzelfde ogenblik zouden raken, onafhankelijk van hun snelheid. Deze resultaten zouden kunnen verklaard worden door het feit dat een trager

aankomend voertuig dat verborgen is door gebouwen vroeger zichtbaar wordt dan een sneller voertuig. Daarom zullen IRIS applicaties rekening moeten houden met de snelheid van de aankomende voertuigen.

- **Timing scooter scenario:** in sommige simulaties werd een waarschuwing gegeven op 20 m voor het rechtsafslaan, in andere op 40 m. Voor beide keuzes lagen de gemiddelde beoordelingen door de deelnemers tussen *op tijd* en *een beetje te laat*. Daarom moet gekeken worden of het praktisch haalbaar is om de waarschuwing nog vroeger te genereren.

Deze experimenten in de rijnsimulator werden als zeer nuttig beschouwd tijdens het eerste ontwerp en ontwikkeling van het IRIS systeem, en leidde tot nieuwe en kostbare kennis over het ontwerp van het systeem. Een eerste **real-life demonstratie** op een echt kruispunt zal worden gegeven in **Helmond, Nederland van 13 tot 16 mei 2009**. Deze demonstraties zullen publiekelijk toegankelijk zijn. Meer informatie hierover zal verschijnen op de Safespot¹⁵ en CVIS¹⁶ project websites.

7.5 Demonstraties gegeven op het 15e ITS World Congress

Op het 15de World Congress on Intelligent Transport Systems (New York 16-20 november 2008) werd binnen de vele demonstraties, ook V2I of Vehicle to Infrastructure, voorgesteld. Binnen dit rapport wordt een kort verslag van de communicatie tussen voertuig en verkeerslichten gegeven.

Vooraf moet vermeld worden dat bij deze demonstratie bijna elke technische documentatie ontbrak en dat de info door de verantwoordelijken erg beperkt was. Men beschikte niet over bijkomende technische info; evenmin werd aangegeven wat de mogelijke implementatiescenario's waren.

7.5.1 SafeTrip-21

In het SafeTrip-21-project (US Departement of Transportation, Research and Innovative Technology Administration) worden verschillende ITS-technieken onderzocht. Ze vertrekken van ingangen: veiligheid, mobiliteit (Weg en reisinformatie), commerciële voertuigen, elektronische tol. Daarbij wordt aandacht besteed aan de milieu- en energieaspecten.

¹⁵ <http://www.safespot-eu.org/>

¹⁶ <http://www.cvisproject.org/>



Figuur 22: Informatie over de maximale snelheid (schoolomgeving)

7.5.2 VII Test Beds

Deze demonstratie toonde in een bus verschillende ITS toepassingen:

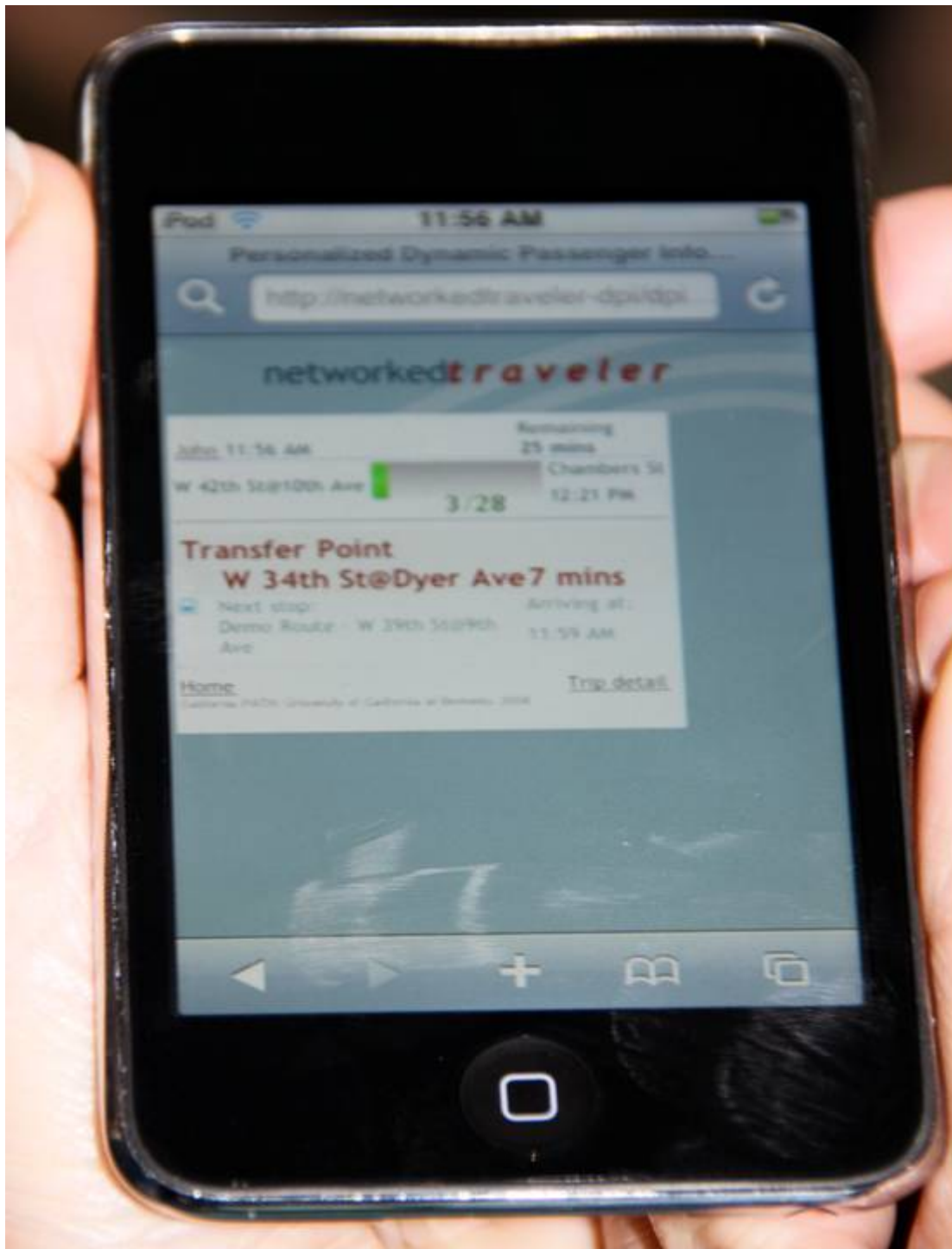
- Tol- en congestietaks
- Reistijd
- Adaptieve (op basis van verkeersdata) routenavigatie
- Real time reisinformatie: luchthaven, ferry, spoor en bus
- Waarschuwingen over ongevallen, congestie, omleidingen, ...
- Parkeren
- HOV (High-occupancy vehicle lane): congestie en beschikbaarheid van rijstrook, ongeval
- Commerciële voertuigen: hoogte- en gewichtwaarschuwing
- Prioritaire verkeerslichtenregeling voor bus

- Info over alternatieve modi
- Informatie van VRI's: info tijd tot rood/groen.



Figuur 23: Informatie VRI

Deze info kan zowel naar een HMI in het voertuig als naar een PDA of iPhone worden gebracht. Het hoeft nauwelijks vermeld dat een verkeerscentrum hier een bepaalde sturing zal moeten geven.



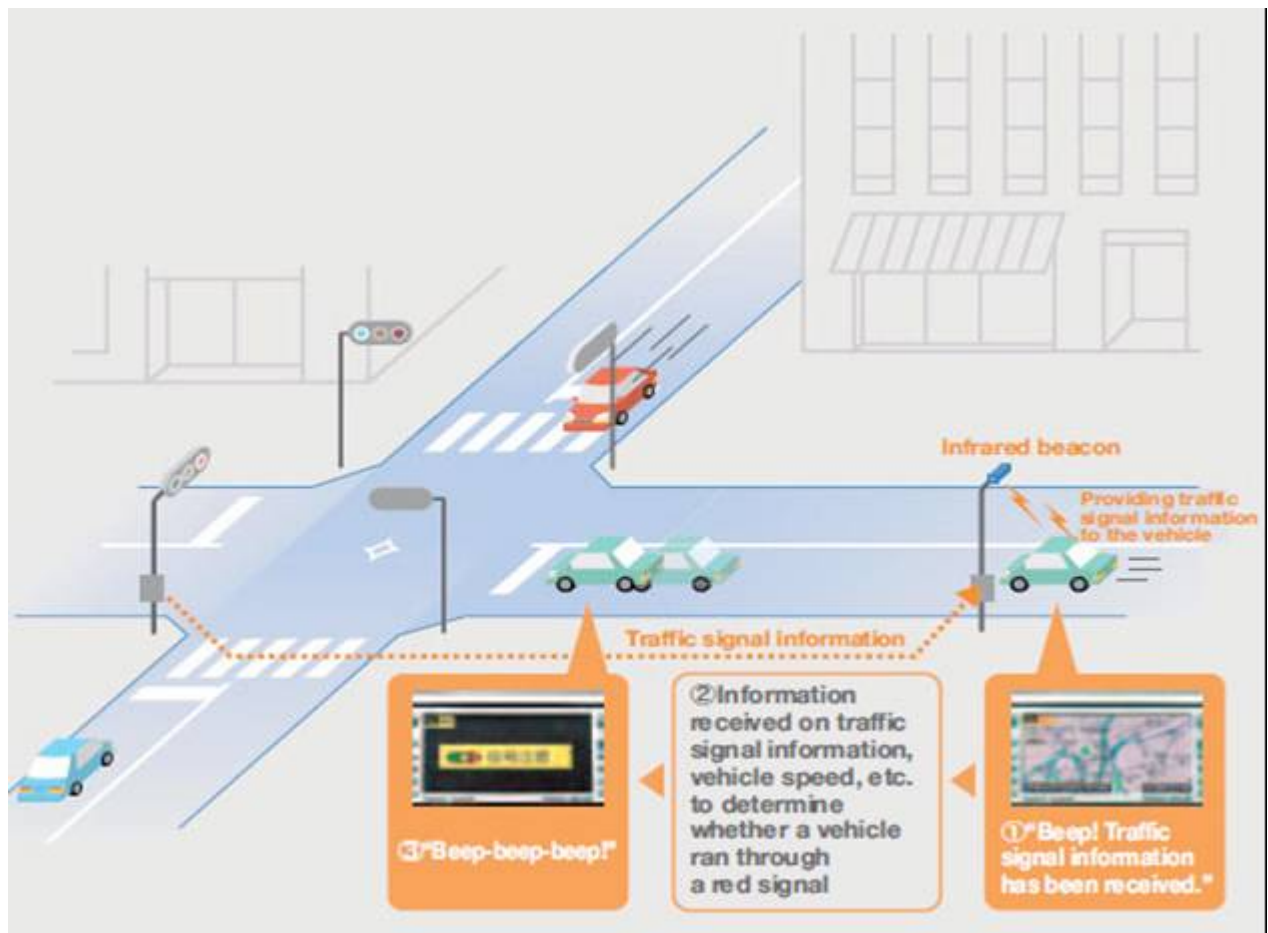
Figuur 24: Info reisinformatie in real time (iPhone)

7.5.3 Toyota demo

Zowel Mercedes Benz, Volkswagen en Toyota toonden toepassingen van V2I.

Toyota geeft aan dat de bedoeling van Vehicle-Infrastructure Cooperative Systems is om veilig rijden te ondersteunen. Daarbij vormt het communiceren tussen voertuigen en infrastructuur een belangrijk onderdeel.

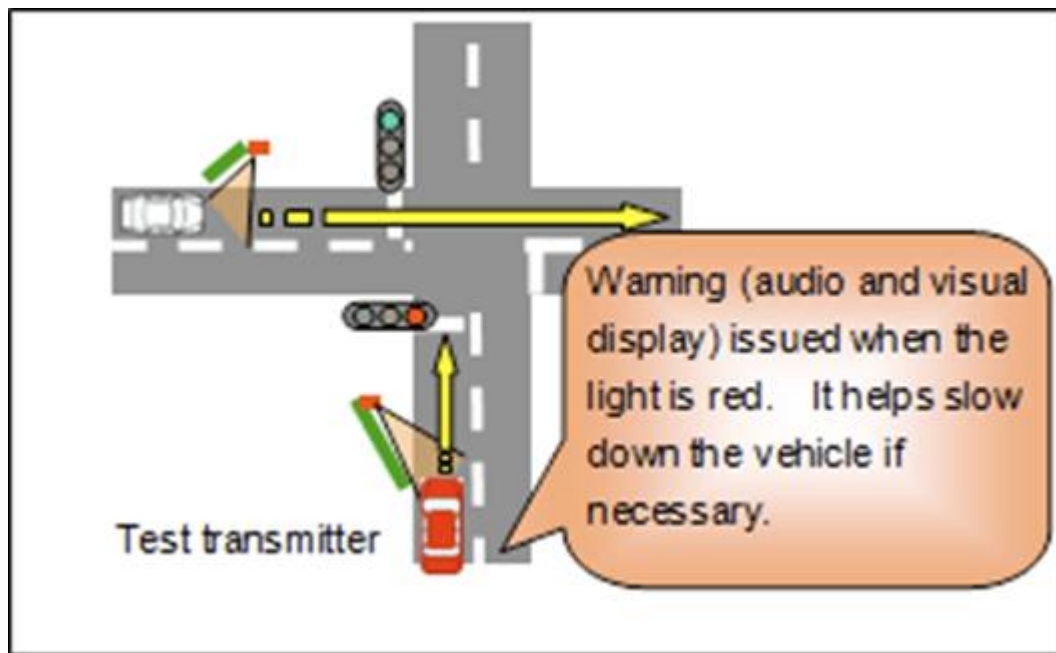
Zowel sensoren als communicatie vormen daartoe het middel.



Figuur 25: Toyota V2I

Om te voorkomen dat voertuigen door het rood licht rijden, zendt een transmitter de informatie van het verkeerslicht naar het voertuig. Van het ogenblik dat er gevaar bestaat dat het voertuig niet tijdig voor het rood licht zal stoppen worden er audio en visuele waarschuwingen naar het voertuig gestuurd.

Eventueel kan het systeem de bestuurder helpen om het voertuig te vertragen.



Daarenboven wil Toyota met de Green Wave Advisor (GWA) de doorstroming van het verkeer monitoren. Daartoe wordt de groen/rood-lichtfasen naar het voertuig gestuurd dat op basis daarvan een aangewezen snelheid krijgt aangeboden. Met deze snelheid kan het voertuig doorheen verschillende VRI's rijden; een groenfase voor deze verschillende kruispunten worden voorzien. (cfr. Travolution Audi).

8. BESLUIT

Dit rapport sluit aan bij het rapport ITS en Verkeersveiligheid, Intelligent Transport Systemen, RA-MOW-2008-007 en vormt een specifieke uitwerking van de mogelijkheden die ITS bieden voor de verkeersveiligheid. In dit geval wordt de toepassing van ITS op kruispunten met verkeerslichten (VRIs) verder bestudeerd.

Vetrekende van de beschikbare ongevalcijfers op kruispunten blijkt dat zowel ongevallen met gewonden als ongevallen met doden voor een belangrijk deel te maken hebben met kruispunten, zowel binnen de EU als in de USA. Voor EU-13 vertegenwoordigt dit 5.476 doden of 21,3 % van alle verkeersdoden. Deze cijfers tonen aan dat het beveiligen van kruispunten –VRI's of gewone kruispunten- een prioriteit in het verkeersveiligheidsbeleid zou moeten zijn.

Bestaand onderzoek werd gevonden dat aantoont dat er een verband is tussen het type kruispunt en de mate van verkeers(on)veiligheid op dat kruispunt. Een logische stap bij het beveiligen van kruispunten is dan ook het herinrichten van kruispunten in kruispunten met verkeerslichten of de aanleg van het kruispunt in een rond punt. Daarnaast zijn nog verschillende andere maatregelen mogelijk. Deze kunnen betrekking hebben op de verkeerslichtenregeling, weginrichting (kanalisatie, afslagstroken, fiets- en voetgangersvoorzieningen, versmallingen, ...), verbetering zichtbaarheid, rijopleiding en educatie, snelheidsmanagement in de omgeving van het kruispunt, handhaving (camera's), wegdekbedekking, ...

Deze maatregelen worden nu reeds toegepast in Vlaanderen om de zware tol aan mensenlevens rond kruispunten te doen dalen. Een nieuwe techniek die echter zeer beperkt in aanmerking wordt genomen is het toepassen van Intelligente Transport Systemen voor de beveiliging van kruispunten. Deze mogelijkheid werd in dit rapport verder onderzocht.

Het toepassen van ITS systemen op kruispunten betekent in de praktijk dat verkeersregelininstallaties op kruispunten voorzien worden van intelligente softwaretoepassingen en eventueel sensoren of draadloze communicatie met naburige voertuigen. Dit heeft positieve effecten op het gebied van verkeersveiligheid, doorstroming en milieu. Verschillende wetenschappelijke publicaties konden worden gevonden die dit aantonen, en een aantal grote Europese onderzoeksprojecten vertrekken ook van deze grondgedachte.

Wat vele van deze studies en projecten gemeen hebben is dat gebruik wordt gemaakt van communicatie tussen de verkeersregelininfrastructuur en de voertuigen. Vertrekende van het overzicht van mogelijke communicatietechnieken uit het vorige steunpuntrapport (RA-MOW-2008-007) werd in dit rapport een lijst opgemaakt van mogelijke geschikte kandidaat technologieën, en van elk hiervan werd een gedetailleerde technische beschrijving opgesteld. Op basis hiervan kon worden besloten welke technieken zouden kunnen toegepast worden in Vlaanderen. Dit besluit stelt dat er op korte tot middellange termijn drie communicatietechnologieën in aanmerking komen: CALM-M5, CALM-IR en IEEE 802.15.4. CALM-M5 is geschikt voor omnidirectionele communicatie met voertuigen, CALM-IR voor directionele communicatie met voertuigen, en IEEE 802.15.4 voor omnidirectionele communicatie met zwakke weggebruikers. Verder onderzoek naar geschikte routeringsprotocollen is wel nodig alvorens CALM-M5 en IEEE 802.15.4 succesvol zullen kunnen worden gebruikt in intelligente verkeersregelininstallaties.

Naast de uitwerking van het communicatieaspect bevat dit steunpuntrapport ook een overzicht van de meest relevante onderzoeksprojecten op het gebied van ITS en kruispunten. Van de meest belangrijke, INTERSAFE, IRIS, Tovergroen, en Travolution werd een gedetailleerde beschrijving gegeven.

De bedoeling van INTERSAFE is om de bestuurder te informeren en/of te waarschuwen voor verkeerslichten; deze informatie/waarschuwing is zo opgesteld dat de bestuurder kennis heeft van de tijd en de aangewezen snelheid om het kruispunt veilig te kruisen of veilig af te slaan. Op de demonstraties met twee demonstratievoertuigen bleek dat op testwegen dit systeem werkte maar dat zowel door de vrijwilligheid als door de aard van de informatie, de veiligheid op kruispunten met VRI's afhankelijk blijkt van de wijze waarop de bestuurder de informatie/waarschuwing negeert of in aangepast rijgedrag omzet.

De resultaten van INTERSAFE worden op dit moment op grotere schaal getest in real-life, in het project Travolution. In Inglostadt werden 46 VRI's uitgerust met de nodige systemen om communicatie met voertuigen mogelijk te maken. Twee testvoertuigen werden gebruikt. Dit systeem zal in een volgende fase uitgebreid worden met 20 auto's en 50 bijkomende VRI's. Een project gelijkaardig aan INTERSAFE is IRIS, waarin wordt vertrokken van informatie beschikbaar in de regelinstallatie (i.p.v. informatie afkomstig van sensoren in de voertuigen).

Het project Tovergroen is een systeem om vrachtwagens selectief te detecteren en indien mogelijk vervolgens prioriteit te verlenen door hun groenfase te verlengen. Tijdens het project waren er problemen met het detectiesysteem, het functioneerde niet optimaal en vrachtwagens werden ofwel niet herkend of verkeerde voertuigen (auto met kampeerwagen, grote campers, ...) worden als vrachtwagens aangeduid. Desondanks werd besloten dat Tovergroen de doorrijkans voor vrachtwagens vergroot met 5 à 10%. Het aandeel van de vrachtwagens dat met de waargenomen snelheid kan doorrijden neemt met 5 à 10% toe. Het aantal forse roodlichtovertredingen door zwaar verkeer neemt met circa 30% af. Verwacht wordt dat het gunstige effect groter zal zijn bij een betrouwbaarder detectie (eventueel mogelijk door toepassing communicatie).

Als algemeen besluit kan men stellen dat uit de beschikbare ongevalcijfers blijkt dat het verhogen van de verkeersveiligheid op kruispunten een prioriteit in het verkeersveiligheidsbeleid zou moeten zijn. Momenteel wordt dit onder andere verwezenlijkt door optimalisatie of heraanleg van kruispunten. In de toekomst zou hier echter ook een sterke vooruitgang kunnen geboekt worden door het toepassen van ITS-technieken op kruispunten. Dit zou naast het verhogen van de verkeersveiligheid ook positieve effecten hebben op doorstroming en het milieu. De technologische basis voor deze systemen, communicatie tussen de voertuigen en de infrastructuur, is momenteel volop in ontwikkeling, maar vereist nog wat verder onderzoek vooraleer deze als matuur genoeg kan beschouwd worden voor een effectieve roll-out. De interesse vanuit Europa in zulke ITS systemen is echter al heel groot, aangezien in verschillende grote Europese onderzoeksprojecten deze systemen reeds worden ontwikkeld en getest. Deze kleinschalige resultaten tonen reeds de technische haalbaarheid aan van het toepassen van ITS systemen voor het verhogen van de verkeersveiligheid rond kruispunten. De volgende stap in het onderzoek is de overgang van de kleinschalige testen naar grotere Field Operational Tests, waaruit zal moeten blijken welke technische uitdagingen nog verder moeten worden aangepakt alvorens deze beloftevolle systemen in de praktijk zullen kunnen worden toegepast.

Naar het beleid toe kan gesteld worden dat er voldoende aandacht moet besteed worden aan de mogelijkheden van deze nieuwe technieken. Enerzijds moet er voldoende geïnvesteerd worden in onderzoek rond de basistechnologieën van deze systemen, en het uitwerken van Field Operational Tests. Anderzijds zal het beleid bij de opbouw van VRI's in de toekomst rekening moeten houden met de mogelijke toepasbaarheid van deze nieuwe systemen, en zal het ook moeten sturen zodat deze techniek niet louter tot informatie/waarschuwen leidt maar ook een verkeersveilig rijgedrag op kruispunten kan betekenen.

9. LITERATUURLIJST

ANTONUCCI, N. D., HARDY, SLACK, K. L., PFEFER, R., NEUMAN, T. R., *A guide for Reducing Collisions at Signalized Intersections*, TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, NCHRP Report 500-12, 133 blz., 2004, ISBN: 0309087600

ANURAG, D, SRIDEEP, G, SOMPRAKASH, B, (2008), *GPS based vehicular collision warning system using IEEE 802.15.4 MAC/PHY standard*, Phuket, ITST 2008

ARANE, *Effecten Tovegroen*, rapport 25 mei 2004, Provincie Noord-Brabant, rapport 03106-039, 31 blz. + bijlagen

BERDER, O, QUEMERAIS, P, SENTIEYS, O, ASTIER, J, NGUYEN, T.D. (2008), *Cooperative communications between vehicles and intelligent road signs*, Phuket, ITST 2008

BERGH, C., RETTING, R., MEYERS, E., *Continued Reliance on Traffic Signals: The Cost of Missed Opportunities to improve Traffic Flow and Safety at Urban Intersections*, september 2005, Insurance Institute for Highway Safety, Harlington, 12 blz.

BARONTI, P, PILLAI, P, CHOOK, V.W.C., CHESSA, S, GOTTA, A, HU, Y.F. (2007), *Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and Zigbee standards*, Computer Communications 30 (7), p 1655-1695

BRITTANY, N., CAMPBELL, B.N., SMITH, J.D., NAJM, W.G. 2004. *Analysis of fatal crashes due to signal and stop sign violations*. Report no. DOT HS-809-779. Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.

CHAN, C-Y, *Enhanced Field Observation of Traffic Patterns for Intersection Collision Warning Systems*, 15th World Congress on ITS, New York, 16-20 november 2008, 12 blz., CD-rom

CVIS project, *D.CVIS.3.1 Reference Architecture*, 2006.

DE BRABANDER, B., *Determinanten van de letselernst bij verkeersongevallen*, Steunpunt-rapport RA-2005-51, januari 2005, blz. 122

DE MOL, J., VAN LEEUWEN, T., VANDENBERGHE, W., VLASSENROOT, S., *ITS en Verkeersveiligheid, Intelligent Transport Systemen*, Steunpuntrapport, Steunpunt Mobiliteit en Openbare Werken, RA-MOW-2008-007, Diepenbeek, 2008, 113 blz.

EAMSOMBOOM, P, KEERATIWINTAKORN, P, MITRPANT, C, (2008), *The performance of Wi-Fi and ZigBee networks for inter-vehicle communication in Bangkok Metropolitan Area*, Phuket, ITST 2008

EICHLER, S, *Performance Evaluation of the IEEE 802.11p WAVE Communication Standard*, 1st IEEE International Symposium on Wireless Vehicular Communications (WiVeC), 2007

FERNANDEZ-CARAMES, T.M., GARCIA-NAYA, J.A., GONZALEZ-LOPEZ, M., CASTEDO, L., *Flex Vehd: A flexible testbed for vehicular radio interfaces*, Phuket, ITST 2008

GERSHENSON, C, (2007), *Design and control of self-organizing systems*, PhD Dissertation VUB.

GOODWIN, C., BARTELS, C., SCHENDZIELORZ, T., BRIGNOLO, R., *A Comparison of U.S. and European Cooperative System Architectures*, 15th World Congress on ITS, New York, 16-20 november 2008, 12 blz., CD-rom

GOLDENBELD, Ch., *Verkeershandhaving in Nederland Inventarisatie van kennis en kennis-behoefte*, SWOV, Leidschendam, 2004, R-2004-15, blz. 92 + 6

GRADINESCO, V, GORGORIN, C, DIACONESCU, R, CRISTEA, V, IFTODE, L, (2007), *Adaptive traffic lights using car-to-car communication*, Dublin, IEEE Vehicular technology conference 2007

HAYASHI, M., FUKUZAWA, S, ICHIKAWA, H, KAWATO, T, YAMADA, J, TSUBOI, T, MATSUI, S, MARUYAMA, T, *Development of Vehicular Communication (WAVE) System for Safety Applications*, Paris, ITST 2007

HWAY-LIEM, O., CATSHOEK, J., BOS, J., VARKEVISSER, G., *Project Roodlicht en Snelheid PROROS*, SWOV 97-35, Leidschendam, 1997, 93 blz.

IKE, W., IKEDA, Y., KIMURA, K., TAKAHARA, M., *Driving Support System for approaching intersections with Stop signs*, 15th World Congress on ITS, New York, 16-20 november 2008, 9 blz., CD-rom

INSURANCE INSTITUTE FOR HIGHWAY SAFETY, *Red light running factors into more than 800 deaths annually; more than half of those who die are hit by red light isolators*, news release, july 13 2000

INSURANCE INSTITUTE FOR HIGHWAY SAFETY, *Comments on "The Red Light Running Crisis: Is it intentional ?"*, news release, may 23 2001.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, *Handbook on Land Mobile Volume 4: Intelligent Transport Systems*, 2006.

ISA, J, KOIJ, J, KOPPEJAN, R, KUIJER, L, (2006), *Reinforcement Learning of Traffic Light Controllers adapting to accidents*, Design and organization of autonomous systems 2006

ITS INTERNATIONAL, July/August 2008

JANSSEN, S.T.M.C., *Veiligheid op kruisingen van verkeersaders binnen de bebouwde kom. Vergelijking van ongevalrisico's*, SWOV, Leidschendam, 2004, R-2003-36, 81 blz

JERBI, M. MARLIER, P. SENOUCI, S.M., *Experimental Assessment of V2V and I2V Communications in Mobile Adhoc and Sensor Systems*, 2007. MASS 2007. IEEE International Conference on Publication, 8-11 Oct. 2007, blz. 1-6, Pisa, ISBN: 978-1-4244-1455-0

KIM, J., PELCZAR, C., JANG, B., *Intersection Safety On Signalized Intersection*, 15th World Congress on ITS, New York, 16-20 november 2008, 7 blz., CD-rom

KOSH, T, ADLER, C, EICHLER, S, SCHROTH, C, STRASSBERGER, M, *The Scalability problem of vehicular ad hoc networks and how to solve it*, IEEE Wireless Communications. - 2006. - 5 : Vol. 13.

KUMARA, S., CHIN, H. ,WEERAKOON, W., *Identification of accident causal factors and prediction of hazardousness of intersection approaches*, Transportation research record ISSN 0361-1981 CODEN TRREDM , 2003, no 1840 (207 p.) [Document : 7 p.]

LAN, K-C, WANG, Z, BERRIMAN, R, MOORS, T, HASSAN, M, *Implementation of a wireless mesh network testbed for traffic control*, 16th international conference on computer communications and networks, Honolulu, 13-16 august 2007

LIAO, C-F, DAVIS, G., *An Adaptive Transit Signal Priority Strategy using GPS/AVL and Wireless Communication Systems*, 15th World Congress on ITS, New York, 16-20 november 2008, 12 blz., CD-rom

MAHMUD MORSI, M, KHALIL, I, UHLEMANN, E, NYGREN, N, *Wireless strategies for future and emerging its applications*, 15th World Congress on Intelligent Transport Systems, New York, 2008.

MCCARTT , A., *Statement before the Ohio Senate Committee on Highways and Transportation Red Light Camera Research*, Insurance Institute For Highway Safety, Arlington, VA 22201, Oktober 2005

MCGEE, H.W., ECCLES, K.A., 2003. *Impact of red light camera enforcement on crash experience*. NCHRP Synthesis of Highway Practice Issue 310. Washington DC: Transportation Research Board.

MCGEE, H. *Making Intersections Safer: A Toolbox of Engineering Countermeasures to Reduce Red-Light Running*. Federal Highway Administration and Institute of Transportation Engineers. 2003, blz. 74

MILLER, J., *"FreeSim - A Free Real-Time V2V and V2I Freeway Traffic Simulator."* IEEE Intelligent Transportation Systems Society Newsletter, December 2007, 10 blz.

MILLER, J., *Fastest path Determination at Lane Granulaity using a Vehicle-to-Vehicle-to-Infrastructure (V2V2I) Intelligent Transportation System Archicecture*, IEEE 4th International Workshop on Vehicle-to-Vehicle Communications in conjunction with IEEE 4th International Intelligent Vehicles Symposium, Eindhoven, The Netherlands, June 2008. 9 blz.

MILLER, J., "*Vehicle-to-Vehicle-to-Infrastructure (V2V2I) Intelligent Transportation System Architecture*." IEEE 4th Intelligent Vehicles Symposium, Eindhoven, The Netherlands, June 2008, 6 blz.

PREVENT INTERSAFE, "*Requirements for intersection safety applicatieons*", D 40.4, SP Deliverable version 2.3, FP6-507075, 6th Framework Programme 70 blz., 28.10.2005.

PREVENT INTERSAFE, "*Project evaluation and effectiveness of the Intersection Safety System*", 40.75 Final Report, FP6-507075, 6th Framework Programme 73 blz., feb. 2007

PREVENT (Preventive and Active Safety Applications) RESPONSE 3, *Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS*, Integrated Project Contract number FP6-507075 Version number V3.0 31.10.2006, 33 blz.

PREVENT INTERSAFE, "*Final report*", IP_D15, IP Deliverable version 1.6, FP6-507075, 6th Framework Programme 198 blz., 07 05 2008.

STARR, R., CROWSON, G., DONATH, M., SHANKWITZ, C., GORJESTANI, A., *Validation of Crash Analysis and Causes. Supporting the need for CICAS* 15th World Congress on ITS, New York, 16-20 november 2008, 12 blz., CD-rom

STIBOR, ZANG, REUMERMANN, *Neighbourhood evaluation of vehicular ad-hoc network using IEEE 802.11p*, 13th European Wireless Conference 2007

PREVENT INTERSAFE Deliverable D 40.56, *Driving Simulator usable unit for Warning Strategies*

RETTING, R.A., WILLIAMS, A.F., PREUSSER, D.F., & WEINSTEIN, H.B., *Classifying urban crashes for countermeasure development*. In: AccidentAnalysis and Prevention, Vol. 27, 1995, blz. 283-294

RETTING, R.A., WILLIAMS, A.F., 1996. *Characteristics of red light violators: results of a field investigation*. Journal of Safety Research 27: blz. 9-15.

RETTING, R.A., KYRYCHENKO, S.Y., 2002. *Reductions in injury crashes associated with red light camera enforcement in Oxnard, California*. American Journal of Public Health 92: blz.1822-1825.

SCHALK, A, STRATIL, H, 2008. *Infrared communication in the context of CALM*, ITS Europe, Geneva, 2008.

SCHMOCKER, J-D, AHUJA, S, BELL, M.G.H., (2007), *Multi-objective signal control of urban junctions – Framework and a London case study*, Transportation Research Part C: Emerging technologies, Volume 16, Issue 4, augustus 2007, p 454-470

STEINGROVER, M, SCHOUTEN, R, PEELEN, S, NIJHUIS, E, BAKKER, B, (2005), *Reinforcement learning of traffic light controller adapting to traffic congestion*, Intelligent Autonomous Systems group, Informatics institute, University of Amsterdam, 2005

TALAS, M., *Building and using a Modern Its Infrastructure in the City of New Yor*, 15th World Congress on ITS, New York, 16-20 november 2008, 13 blz., CD-rom

VAN DER HORST, R. 1988. *Driver decision making at traffic signals*. Transportation Research Record 1172: Blz. 93-97

VREESWIJK, J., TURKSMA, J., SCHENDZIELORZ, T., MATHIAS, P., (2008a) *Vulnerable Road User Protection at Intelligent Intersection*, 15th World Congress on ITS, New York, 16-20 november 2008, 8 blz., CD-rom

VREESWIJK, J, SCHENDZIELORZ, T, MATHIAS, P, FEENSTRA, P, PAUWELUSSEN, J, (2008b), *Driving simulator study for intelligent cooperative intersection safety systems (IRIS)*, Geneva, ITS Europe 2008

WEZETZER, C, CALISKAN, M, MEIER, K, LUEBKE, A, *Experimental evaluation of UMTS and Wireless LAN for inter-vehicle communication*, Paris, ITST 2007

WIERING, M, VAN VEENEN, J, VREEKEN, J, KOOPMAN, A, (2004), *Intelligent Traffic Light Control*, technical report UU-CS-2004-029

YANIS, G., EVGENIKOS, P., CHAZIRIS, A., BROUGHTON, J., LAWTON, B., WALTER, L., HOEGLINGER, S., LEITNER, T., BOS, N., REURINGS, M., ANDREU, M., PACE J.-F., SANMARTIN, J., *Traffic Safety Basic Facts 2007, Junctions*, European Road Safety Observatory, februari 2008, blz. 11

YOSHIZU, S., OGURI, H., MIYAKOSHI, T., *Estimation of Accident Reduction Effect of Cooperative Safety System using Actual Road Test Data*, 15th World Congress on ITS, New York, 16-20 november 2008, 11 blz., CD-rom

ZONDAG, P., *Evaluatie Tovergroen, onderzoek naar werking en effecten van Tovergroen in 2 VRI's op de N65 tussen Tilburg en 's Hertogenbosch*, projectnummer 188502, 5 februari 2007, Grontmij Nederland, 67 blz. + bijlagen.