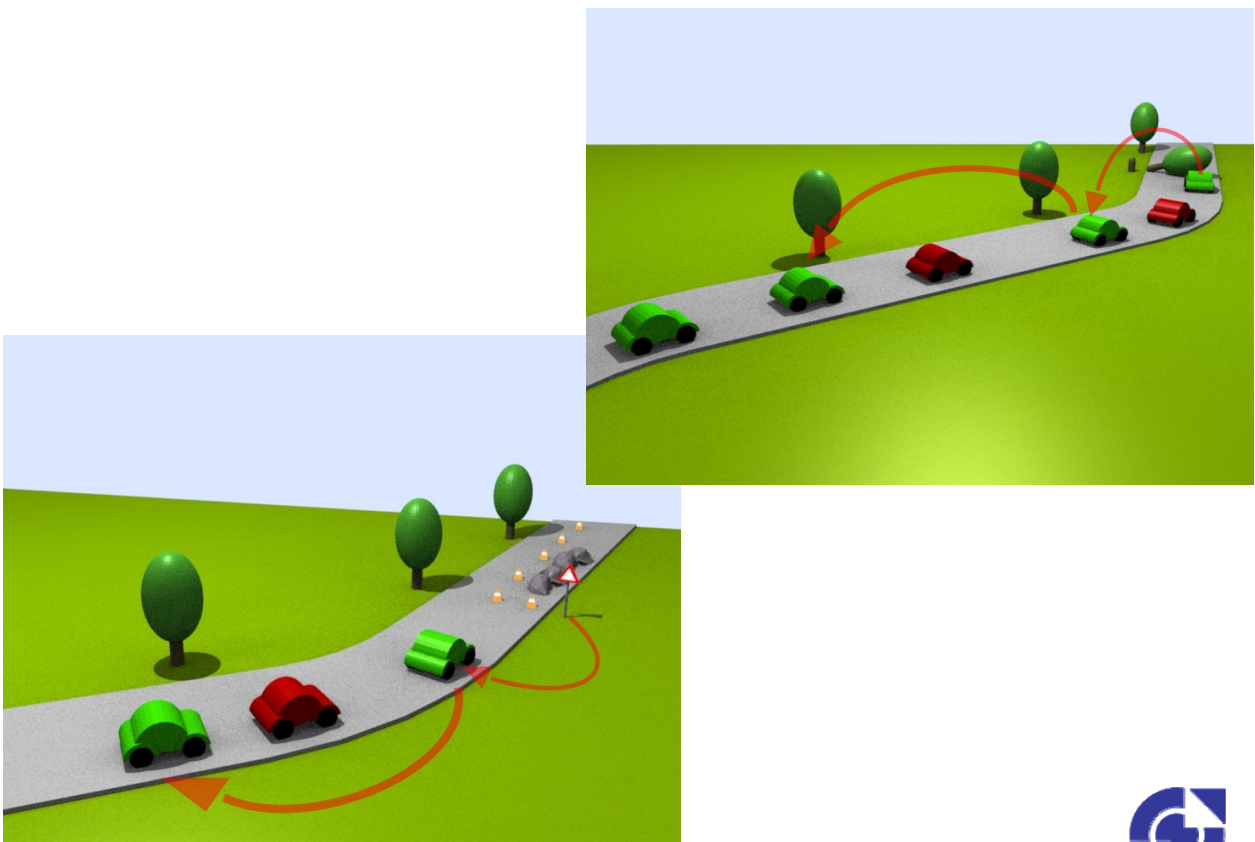


Slimme auto's – wordt het veiliger op de weg?

Een simulatie onderzoek naar de effecten van het coöperatieve ADA-systeem WILLWARN, op de verkeersveiligheid



Universiteit Twente
de ondernemende universiteit

Naam:
Studentnr.
Afstudeercommissie:

L.M.H.P.G. De Baere
010255
Prof. Dr. Ir. M.F.A.M. van Maarseveen
Drs. T.W. Schaap
Dr. T. Thomas

Auteur

Naam: L. M. H. P. G. De Baere
Studentnr: 0102555

Afstudeercommissie

Prof. Dr. Ir. M.F.A.M. van Maarseveen
Drs. T.W. Schaap
Dr. T. Thomas

Afstudeeronderzoek

Titel: Slimme auto's, word het veiliger op de weg?
Subtitel: *Een simulatie onderzoek naar de effecten van het coöperatieve ADA-systeem WILLWARN, op de verkeersveiligheid*

Instelling: Universiteit Twente, Faculteit Construerende Technische Wetenschappen, Kenniscentrum AIDA (Applications of Integrated Driver Assistance)
Locatie: Universiteit Twente, Faculteit Construerende Technische Wetenschappen

Contactadressen

Universiteit Twente
Faculteit Construerende Technische Wetenschappen
Opleiding Civiele Techniek
Afdeling Verkeer, Vervoer en Ruimte
Postbus 217
7500 AE Enschede

Telefoon 053 – 489 4322
Fax 053 – 489 4040
Internet <http://www.vvr.ctw.utwente.nl>

Rapport

Document: Eindrapport
Versie: Afst_L_De_Baere_Rapport_Definitief
Status: Definitief
Datum: 1 Juni 2007

Alle rechten voorbehouden. Behoudens uitzonderingen door de wet gesteld, mag zonder schriftelijke toestemming van de rechthebbenden niets uit dit document worden verveelvoudigd en/of openbaar worden gemaakt door middel van druk, fotokopie, digitale reproductie of anderszins.

Samenvatting

Verkeersveiligheid is een steeds terugkerend onderwerp in discussies over mobiliteit. Sinds de komst van de auto zijn er al vele slachtoffers te betreuren geweest, met als dieptepunt 1972, waarin in Nederland ongeveer 3300 doden te betreuren vielen. Gedurende de afgelopen decennia is het aantal slachtoffers in het verkeer gestaag afgenomen tot 730 in 2006. Deze afname is te danken aan verschillende oorzaken: voertuigen die veiliger zijn geworden, betere infrastructuur en veranderingen in het gedrag van weggebruikers. De verwachting is echter dat in de toekomst het aantal slachtoffers als gevolg van verkeersongevallen weer gaat toenemen. Een van de mogelijkheden om dit te voorkomen is invoering van zogenaamde ADA-systemen, of Advanced Driver Assistance Systems. ADA-systemen kunnen onderverdeeld worden in een tweetal categorieën: stand-alone systemen en de coöperatieve systemen. Van beide vormen ADA-systemen wordt veel verwacht, echter de coöperatieve systemen hebben de toekomst. Als de coöperatieve ADA-systemen nader onder de loep worden genomen, dan kunnen deze nog verder opgesplitst worden, namelijk in systemen waar voertuig – voertuig communicatie (V2V) centraal staat en systemen waarin communicatie tussen voertuig en infrastructuur (V2I) centraal staat. In dit onderzoek zal WILLWARN (Wireless Local Hazard Warning) centraal staan.

Het doel van dit onderzoek is de effecten van WILLWARN op de verkeersveiligheid te onderzoeken. Veel ongevallen zijn het gevolg van bestuurders die niet of onvoldoende anticiperen op gevaarlijke omstandigheden als: gladheid, beperkt zicht (mist), obstakels op de weg of wegwerkzaamheden. Als bestuurders met behulp van WILLWARN vroegtijdig gewaarschuwd kunnen worden voor deze omstandigheden dan kunnen zij hierop hun gedrag aanpassen. Om dit onderzoek te kunnen uitvoeren is gebruik gemaakt van een micro-simulatiemodel (Paramics in combinatie met ITS-modeller). Met behulp van dit model kan het ADA-systeem zo nauwkeurig mogelijk beschreven worden. Niet alleen het ADA-systeem moet gemodelleerd worden, ook het netwerk, de hazard en de gedragsveranderingen van de bestuurder zijn gemodelleerd.

- Om de effecten te kunnen meten is besloten om met een eenvoudig netwerk te werken. Het netwerk bestaat uit negen kilometer lange weg, met twee rijstroken waarop de maximumsnelheid 80 km/h bedraagt. Het netwerk is bewust eenvoudig gehouden omdat de nadruk in dit onderzoek alleen ligt op de effecten die WILLWARN kan hebben in het geval van een hazard op de rijbaan.
- De hazard die gesimuleerd is bestaat uit een link in het netwerk die een verlaagde maximumsnelheid heeft van 15 km/h. Door voor deze link twee korte links in het netwerk aan te brengen kunnen voertuigen deze plotselinge snelheidsverandering niet “zien”. Hierdoor ontstaat een gevaarlijke situatie op het netwerk. WILLWARN kan nu vroegtijdig waarschuwen voor de link met verlaagde snelheid zodat bestuurders vroegtijdig hun gedrag aan kunnen passen.
- Op het moment dat de hazard aanwezig is op het netwerk wordt deze door WILLWARN voertuigen gedetecteerd. Als het eerste voertuig met WILLWARN de link bereikt waarop de snelheid is verlaagd zal er een waarschuwing aan de andere voertuigen worden verzonden. Deze waarschuwing wordt tot een afstand van maximaal 2,0km voor de hazard verzonden. Aangezien ieder individueel voertuig in een straal van maximaal 200m kan verzenden wordt ook gebruik gemaakt van het tegemoetkomende verkeer om de waarschuwing te verzenden. Op basis van deze waarschuwing passen de voertuigen hun gedrag vroegtijdig aan. Na verloop van tijd verdwijnt de hazard van het netwerk. WILLWARN voertuigen detecteren dat er geen hazard meer is waarna een bericht wordt verzonden dat er geen hazard meer is. Alle voertuigen hervatten nu weer hun normale gedrag.

- Gedragsverandering die de bestuurders in dit onderzoek aannemen zijn een vroegtijdige aanpassing van de (wens)snelheid of van de (wens)volgafstand. In beide gevallen wordt de aanpassing gecombineerd met een verlaging van de reactietijd. In de scenario's met een aangepaste (wens)snelheid remmen bestuurders vanaf 250m voor de hazard gelijkmatig af naar 50 km/h om vervolgens ter plekke van de hazard nog af te remmen tot 15 km/h. In de scenario's met aangepaste (wens)volgafstand vergroten bestuurders vanaf 1000 m voor de hazard hun (wens)volgafstand met een factor 1,2.

Met behulp van het simulatiemodel zijn verschillende scenario's onderzocht, waarbij niet alleen gevarieerd is met de gedragsaanpassing van de bestuurder. Ook is bekeken van voor gevolgen de penetratiegraad van WILLWARN voor invloed heeft op de effecten. Om de invloed van WILLWARN te kunnen meten is gebruik gemaakt van een drietal indicatoren: Time To Collision, standaarddeviatie van de snelheid en de verdeling in de remvertraging. Deze drie indicatoren geven een beeld van de verkeersveiligheid op het gesimuleerde netwerk.

Na een uitvoerige analyse van de data, kan geconcludeerd worden dat vroegtijdig waarschuwen van bestuurders voor gevaarlijke situaties daadwerkelijk bijdraagt aan de verkeersveiligheid. Uit de resultaten bleek dat ook bij een zeer kleine penetratiegraad (5%) WILLWARN een significant positief effect heeft op de verkeersveiligheid. Bij toenemende penetratiegraad heeft het systeem een steeds sterker effect. Bij een penetratiegraad van 50% en bestuurders die hun (wens)snelheid aanpassen het aantal gevaarlijke situaties bijna tot nul procent gereduceerd.

Als beide gedragsveranderingen met elkaar vergeleken worden dan blijkt dat vroegtijdige aanpassing van de (wens)snelheid het meeste effect heeft. Bij alle penetratiegraden heeft deze aanpassing een significant groter effect dan aanpassing van de (wens)volgafstand. Dit is mogelijk te verklaren door de invloed die een aanpassing van de (wens)snelheid heeft op andere voertuigen. Doordat voertuigen uitgerust met WILLWARN hun snelheid verlagen zijn de overige voertuigen ook genooddaakt om hun snelheid te verlagen. Naarmate de penetratiegraad toeneemt, neemt ook dit effect toe en worden steeds meer voertuigen beïnvloed door de gewaarschuwde voertuigen. Dit zorgt ervoor dat een aanpassing van de (wens)snelheid het meeste effect heeft. Om maximaal te kunnen profiteren van WILLWARN kan het beste aan de bestuurders geadviseerd worden om hun snelheid vroegtijdig aan te passen.

Summary

Smart Cars – Will it be safer on the road?

A Simulation research on the effects on traffic safety of the cooperative ADA-system WILLWARN

Traffic safety is a reoccurring subject in discussions about mobility. Since the introduction of the car there have been many traffic victims, with an absolute low in 1972, when there were 3300 traffic fatalities in the Netherlands. During the last decennia the number of traffic victims has slowly decreased to 730 in 2006. This decrease has different causes, such as: safer vehicles, improved infrastructure and changes in the behaviour of motorists. Even though the roads have become safer, the expectation is that the number of traffic victims will increase again in the future. A possibility to avoid this increase, are the so-called ADA-systems or Advanced Driver Assistance Systems, these systems raise high expectations. The ADA-systems can be sub-divided in two categories: stand-alone systems and co-operative systems. Both categories ADA-systems raise high expectations, although the co-operative systems have the future. The co-operative ADA-systems can be further divided in sub-categories, namely systems that centralize around vehicle to vehicle information (V2V) and systems that centralizes vehicle to infrastructure communication (V2I). This research concerns WILLWARN (Wireless Local Hazard Warning). WILLWARN is based on vehicle to vehicle communication.

Goal of this research was to examine what the effects of WILLWARN will be on traffic safety. In practice many accidents are due to drivers who don not anticipate sufficient to dangerous driving conditions like: slippery roads, low visibility, obstacles and road-works. With WILLWARN drivers will be warned early so they can adapt their behaviour. To research the effects of WILLWARN the ADA-system had to be simulated in a micro-simulation model. In this research the model Paramics is used in combination with the ITS – modeller from TNO. With this model the ADA-system can be simulated as precise as possible. The ADA-system had to be simulated along with the network, the hazard and the changes in driver behaviour:

- To measure the effects, a simplified network was set up. The network consists of a nine kilometre long straight road with two carriageways. The maximum speed on this road is 80 km/h. The network has been kept simple deliberately, because the emphasis in this research lies on the impact of WILLWARN on traffic safety. A larger and more complicated network is not useful in this research.
- To create a hazard on the network, a link with a maximum speed of 15 km/h is added in the network. By introducing two small links before this link, drivers are unable to see the large speed difference timely. Because of this, vehicles in the simulation slow down at the last moment and dangerous situations start to occur. With WILLWARN vehicles and their drivers will be warned for this situation in advance and the driver can timely adapt his behaviour.
- From the moment the hazard is present on the network, it is detected by WILLWARN vehicles. When the first WILLWARN vehicle has passed the beginning of the link with the lowered maximum speed, a warning is send to other vehicles. This warning is send maximally 2,0 km from the start of the hazard. Because an individual vehicle can only send a warning over a distance of 250m, the approaching traffic is used to spread the warning. Based on this warning the WILLWARN vehicles adjust their behaviour. In time the hazard disappears from the network.

From this moment WILLWARN vehicles will not detect a hazard anymore, and start sending a message that the hazard is gone. Vehicles who receive this message now resume their normal behaviour.

- In this research drivers will change their behaviour in two different ways. They can prematurely adjust their velocity or their following distance. Both behavioural changes are combined with a reduction of the driver's reaction time. Drivers who adjust their velocity, start to reduce their speed 250m for the hazard and reduce their speed to 50 km/h. Drivers who increase their following distance, increase their following distance with a factor 1,2. They start to adjust the distance 1000m before the hazard.

During the research different scenarios are examined. These scenarios are based on the behavioural changes of the driver and the market penetration of WILLWARN. To measure the effects of WILLWARN three safety indicators are used: Time To Collision, Standard deviation of the speed and the distribution of the deceleration. These three safety indicators give an image of the traffic safety on the simulated network.

After a comprehensive analysis of the data it can be concluded that the introduction of an ADA-system would have a positive effect on traffic safety. Even in case of a small market penetration (5%) WILLWARN has a significant positive effect on traffic safety. When the market penetration increases, the system has an increasing positive effect. In case of a market penetration of 50%, and drivers who adjust their speed, the number of dangerous situations is almost reduced to 0%.

If the two behavioural changes are compared with each other, it becomes clear that an early adjustment of the speed has more effect on traffic safety than changing the following distance. The cause of this is partly due to the fact that the decrease in speed of individual vehicles influences other vehicles on the network. When vehicles with WILLWARN decrease their speed other vehicles are also forced to adjust their speed. If the market penetration increases, this effect increases as well. More and more vehicles are influenced by WILLWARN vehicles. Because of this, an early adjustment of the vehicles speed has a greater influence on traffic safety than adapting the following distance. In case of a market introduction of WILLWARN it is desirable to give drivers the advice to adapt their speed early.

Voorwoord

Steeds vaker is de auto negatief in het nieuws, door zware ongelukken, uitstoot van broeikasgassen en de voortdurend stijgende vraag naar fossiele brandstoffen. Om deze negatieve ontwikkelingen tegen te gaan is de auto-industrie steeds innovatiever te werk meegaan bij het ontwerpen van nieuwe modellen. De vraag is echter of deze ontwikkelingen snel genoeg gaan.

In dit perspectief is door Stichting Natuur en Milieu en de drie technische universiteiten in 2006 een ambitieus project gestart, "Auto van de Toekomst". Het idee achter dit project was het bewust maken van zowel de auto-industrie als gewone consumenten, dat de ontwikkelingen naar schonere en veiligere voertuigen veel sneller kan gaan. Om dit te kunnen bereiken moest op de AutoRai 2007 een model van de "Auto in de Toekomst" verschijnen. Door het projectteam bestaande uit studenten van iedere universiteit is gedurende anderhalf jaar hard gewerkt. Ieder van de studenten en de universiteiten had hierin zijn eigen werkzaamheden, echter ook communicatie tussen de verschillende partijen was een essentieel onderdeel van het project. Uiteindelijk is het ons als studentteam gelukt om met een model op de AutoRai te komen, en hoe! Grote hoeveelheden pers, lovende kritieken en enthousiaste mensen die het initiatief alleen maar toejuichten. Het was een groot succes en naar alle waarschijnlijkheid zal er nog een vervolg komen. Ik kan achteraf alleen maar zeggen dat het een geweldige ervaring is geweest.

Binnen "Auto van de Toekomst" lag de focus voor mij vooral op de zogenaamde ADA-systemen. Deze systemen ondersteunen bestuurders bij het uitvoeren van de rijtaak en kunnen hierdoor bijdragen aan een verbeterde verkeersveiligheid. In mijn onderzoek heb ik mij gericht op een coöperatief ADA-systeem, dat bestuurders tijdig kan waarschuwen voor gevaarlijke situaties met behulp van informatie van andere voertuigen.

Bij deze wil ik gebruik maken van de gelegenheid om enkele mensen speciaal te bedanken, in willekeurige volgorde:

- Dhr. Van Maarseveen, afstudeerdocent (Universiteit Twente)
- Mevr. N. Schaap, dagelijkse begeleider (Universiteit Twente)
- Dhr. T. Thomas, dagelijkse begeleider (Universiteit Twente)
- Dhr. M. van Noort, technische ondersteuning simulatieprogramma (TNO Delft)

Tot slot wil ik graag mijn ouders en vrienden bedanken voor de bijdrage die zij, ieder op zijn of haar manier, heeft geleverd tijdens mijn studie(tijd) en in het bijzonder bij het afronden daarvan.

Enschede 1 juni 2007,

Lucien De Baere

Inhoudsopgave

1	Inleiding	- 2 -
1.1	Algemeen	- 2 -
1.2	Coöperatieve ADA-systemen	- 6 -
1.3	Doelstelling	- 8 -
1.4	Leeswijzer	- 9 -
2	Werking “WILLWARN”	- 10 -
2.1	Individuele situatie analyse	- 11 -
2.1.1	Obstakels	- 11 -
2.1.2	Verminderd zicht	- 12 -
2.1.3	Wegwerkzaamheden	- 13 -
2.1.4	Gladheid	- 13 -
2.2	Coöperatieve situatie analyse	- 14 -
2.3	Informatie verwerking	- 14 -
2.4	Verspreiding informatie	- 14 -
2.5	Interface bestuurder	- 15 -
2.6	Verantwoording Situaties	- 16 -
3	Simulatie omschrijving	- 18 -
3.1	Netwerk	- 18 -
3.1.1	Hazard	- 18 -
3.1.2	Wegvak	- 19 -
3.2	Systeem	- 21 -
3.2.1	Simulatiemodel	- 21 -
3.2.2	WILLWARN in simulatie	- 22 -
3.3	Veranderingen bestuurdersgedrag	- 23 -
3.4	Onderzoeksmethodiek	- 26 -
3.5	Indicatoren verkeersveiligheid	- 28 -

4	Resultaten simulatie.....	- 30 -
4.1	Algemeen.....	- 30 -
4.2	Resultaten Link 7.....	- 33 -
4.2.1	Minuut 2 t/m 9.....	- 33 -
4.2.2	Minuut 1.....	- 35 -
4.3	Resultaten Link 5.....	- 37 -
5	Conclusies en Aanbevelingen.....	- 39 -
5.1	Conclusies.....	- 39 -
5.2	Discussie.....	- 40 -

Bijlagen

Bijlage 1:	Referenties	II
Bijlage 2:	Time To Collision Link 7	VI
Bijlage 3:	Standaarddeviatie Snelheid Link 7	XI
Bijlage 4:	Remvertraging Link 7	XV
Bijlage 5:	Time To Collision Link 5	XIX
Bijlage 6:	Standaarddeviatie Snelheid Link 5	XXII
Bijlage 7:	Remvertraging Link 5	XXIV

Tabellen

Tabel 1.1:	Doelstelling overheid aantal verkeersslachtoffers 2020	Blz. 2
Tabel 1.2:	Situaties waarin WILLWARN werkzaam is	Blz. 7
Tabel 2.1:	Overzicht detectiemethoden van hazards door WILLWARN	Blz. 11
Tabel 3.1:	Overzicht verkeersaanbod in de verschillende perioden van de simulatie	Blz. 20
Tabel 3.2:	Overzicht opbouw netwerk en de lengte van de afzonderlijke links in meters	Blz. 21
Tabel 3.3:	Penetratiegraden welke toegepast zullen worden in het simulatieonderzoek	Blz. 26
Tabel 3.4:	Overzicht van de verschillende scenario's en de bijbehorende gedragsaanpassingen	Blz. 27
Tabel 4.1:	Voorbeeld referentiesituatie ter bepaling variantie laatste negen minuten van de hazard	Blz. 31

Figuren

Figuur 1.1:	Adaptive Cruise Control weergave werking	Blz. 4
Figuur 1.2:	Overzicht ongeval oorzaken Duitsland	Blz. 6
Figuur 1.3:	Local Hazard Warning (WILLWARN), een toekomstig ADA-systeem	Blz. 7
Figuur 2.3:	Werking WILLWARN in schema vorm	Blz. 10
Figuur 2.1:	Detectie gevaarlijke obstakels en het verzenden van deze informatie aan andere bestuurders op het netwerk	Blz. 12
Figuur 2.2:	Afwijkende detectie van wegwerkzaamheden, waarbij de infrastructuur bijdraagt aan het detecteren en verzenden van de noodzakelijke informatie	Blz. 13
Figuur 3.1:	Overzicht netwerk, totale lengte netwerk 9200m. De hazard ontstaat op 4100m. In dit onderzoek wordt alleen de zuidelijke rijstrook onderzocht (west-oost)	Blz. 19
Figuur 3.2:	Maximale zendafstand individuele voertuig	Blz. 23

Grafieken

Grafiek 4.1:	Referentiesituatie en scenario, 20% penetratiegraad en snelheid aangepast, uitgezet tegen de tijd met de bijbehorende standaardafwijkingen per minuut.	Blz. 30
Grafiek 4.2 A:	Link 7 Percentage TTC kleiner dan 1,0s uitgezet tegen penetratiegraad voertuigen uitgerust met ADA-systeem (minuut 2 t/m 9)	Blz. 33
Grafiek 4.2 B:	Link 7 Percentage TTC kleiner dan 2,0s uitgezet tegen penetratiegraad voertuigen uitgerust met ADA-systeem (minuut 2 t/m 9)	Blz. 33
Grafiek 4.2 C:	Link 7 Standaarddeviatie van de snelheid uitgezet tegen penetratiegraad voertuigen uitgerust met ADA-systeem (minuut 2 t/m 9)	Blz. 33
Grafiek 4.2 D:	Link 7 Percentage remvertraging kleiner dan $-4,5\text{m/s}^2$ uitgezet tegen penetratiegraad voertuigen uitgerust met ADA-systeem (minuut 2 t/m 9)	Blz. 33
Grafiek 4.3 A:	Link 7 Percentage TTC kleiner dan 1,0s uitgezet tegen penetratiegraad voertuigen uitgerust met ADA-systeem (minuut 1)	Blz. 35
Grafiek 4.3 B:	Link 7 Percentage TTC kleiner dan 2,0s uitgezet tegen penetratiegraad voertuigen uitgerust met ADA-systeem (minuut 1)	Blz. 35
Grafiek 4.3 C:	Link 7 Standaarddeviatie van de snelheid uitgezet tegen penetratiegraad voertuigen uitgerust met ADA-systeem (minuut 1)	Blz. 35
Grafiek 4.3 D:	Link 7 Percentage remvertraging kleiner dan $-4,5\text{m/s}^2$ uitgezet tegen penetratiegraad voertuigen uitgerust met ADA-systeem (minuut 1)	Blz. 35
Grafiek 4.4 A:	Link 5 Percentage TTC kleiner dan 1,0s uitgezet tegen penetratiegraad voertuigen uitgerust met ADA-systeem (minuut 1)	Blz. 37
Grafiek 4.4 B:	Link 5 Percentage TTC kleiner dan 2,0s uitgezet tegen penetratiegraad voertuigen uitgerust met ADA-systeem (minuut 1)	Blz. 37
Grafiek 4.4 C:	Link 5 Standaarddeviatie van de snelheid uitgezet tegen penetratiegraad voertuigen uitgerust met ADA-systeem (minuut 1)	Blz. 37
Grafiek 4.4 D:	Link 5 Percentage remvertraging kleiner dan $-4,5\text{m/s}^2$ uitgezet tegen penetratiegraad voertuigen uitgerust met ADA-systeem (minuut 1)	Blz. 37

1 Inleiding

1.1 Algemeen

Sinds de mens meerdere mogelijkheden heeft om zich te verplaatsen, zijn er ook steeds conflicten geweest tussen de verschillende vervoersmodaliteiten. Helaas leiden deze conflicten nog maar al te vaak tot het verlies van mensenlevens. In het bijzonder in de periode 1950 tot en met 1972 is er een sterke stijging geweest van het aantal verkeersdoden. Het aantal slachtoffers in Nederland steeg van 1042 in het jaar 1952 naar het absolute dieptepunt, 3264 doden in het jaar 1972. Na deze piek, is er gedurende de laatste tientallen jaren een gestage afname van het aantal slachtoffers te zien. Dit heeft geleid tot een aantal van 730 slachtoffers in het jaar 2006 (www.Swov.nl). Deze daling in het aantal verkeersdoden kan toegeschreven worden aan verschillende oorzaken, welke hieronder kort zullen worden beschreven.

Als eerste is de afname van het aantal verkeersslachtoffers een gevolg van een veranderend beleid van de overheid. De overheid heeft zich op verschillende aspecten gericht gedurende verschillende tijdsperiodes. In de periode 1970 tot en met 1985 richtte men zich voornamelijk op het invoeren van algemene snelheidslimieten, invoering van de gordel draagplicht voor de bestuurder en bijrijder en het instellen van een maximum alcoholpromillage. In de jaren '90 werd door de overheid steeds meer de nadruk gelegd op ontwikkelingen in de infrastructuur met als overkoepelende naam "Duurzaam Veilig". Binnen dit ontwerpkader werd getracht om de infrastructuur zodanig aan te passen dat de verkeersveiligheid meer nadruk kreeg. Deze verandering in beleid en infrastructuur heeft een positieve invloed gehad op de verkeersveiligheid. Ondanks deze positieve ontwikkeling is het zaak dat de overheid aandacht houdt voor de verkeersveiligheid. Dit wordt door de verwachtingen voor het jaar 2020 onderstreept. Door de Nederlandse overheid is in 2004 de Nota Mobiliteit opgesteld, waarin een schatting van het aantal slachtoffers in 2020 is opgenomen. Door een forse toename van de mobiliteit met name op het gebied van goederenvervoer, zouden er bij gelijkblijvend beleid ongeveer 1025 slachtoffers te betreuren zijn.

Tevens is in de Nota Mobiliteit de doelstelling van de overheid opgenomen ten opzichte van het aantal verkeersslachtoffers. De overheid heeft zich ten doel gesteld het aantal slachtoffers in 2020 niet te laten toenemen tot 1025 slachtoffers, maar juist te laten afnemen tot 640 doden, zie ook tabel 1.1 waarin de gewenste ontwikkelingen van de overheid zijn opgenomen.

<i>Jaar</i>	<i>Dodental</i>	<i>Reizigerskilometers</i>	<i>Doden per miljard reizigerskilometers</i>
2002	1066	163 miljard	6,6
2010	900 (doelstelling)	180 miljard (prognose)	5,0
2020	640 (doelstelling)	195 miljard (prognose)	3,3

Tabel 1.1: Doelstelling overheid aantal verkeersslachtoffers 2020
(Eigen bewerking Bron: Nota Mobiliteit 2004)

De overheid wil door toepassing van een integrale aanpak deze doelstellingen gaan halen. Hierbij wordt er op verschillende aspecten actie ondernomen om de verkeersveiligheid te verhogen. Zo wordt er geïnvesteerd in het veiliger maken van de infrastructuur en tracht de overheid het gedrag van de verkeersdeelnemers in de toekomst te verbeteren. Deze beide speerpunten zouden in de periode tot 2010 ongeveer 40% van de verkeersveiligheidswinst voor hun rekening moeten nemen. In de periode tussen 2010 en 2020 zouden deze maatregelen nog voor slechts 10% bij kunnen dragen aan de winst. De overheid zal dan ook andere maatregelen en oplossingen moeten toepassen om de beoogde winst te behalen.

Zoals blijkt, heeft het beleid van de overheid in het verleden een positief effect gehad op de verkeersveiligheid. Echter voor de toekomst is alleen het beleid van de overheid niet voldoende om aan de door hun gestelde doelstellingen te voldoen.

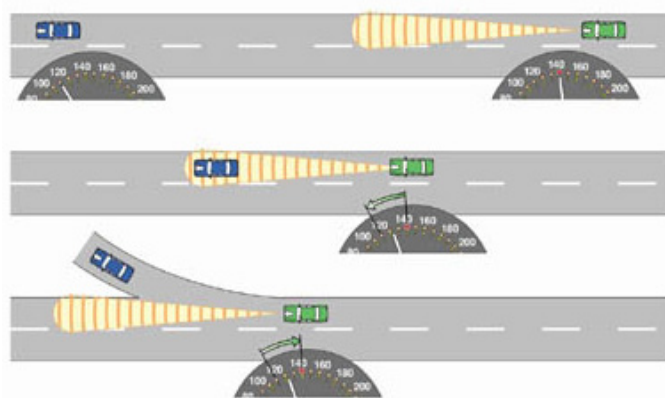
Een tweede belangrijke oorzaak voor de daling van het aantal verkeersslachtoffers in de periode tussen 1972 en 2004 komt op het conto van de auto-industrie. De auto-industrie heeft zich de laatste tientallen jaren nadrukkelijk gericht op het ontwikkelen van veilige auto's. Onder invloed van overheidsbeleid zijn autofabrikanten aangezet om veiligere voertuigen te ontwikkelen. Toch zijn niet alleen beleidsmaatregelen hiervoor verantwoordelijk. Autofabrikanten hebben ook op eigen initiatief ervoor gezorgd dat auto's steeds veiliger zijn geworden. Doordat de veiligheid van een auto voor veel consumenten (automobilisten) een belangrijk aankoopargument is, heeft de auto-industrie baat bij het ontwikkelen van veilige auto's. Zo is de driepunts-autogordel in 1959 op de markt gekomen. Doordat het gebruik van de gordel in de jaren na de introductie een grote vlucht had genomen, heeft de overheid in 1975 besloten om een gordeldraagplicht in te voeren (Van Kampen et al, 2005). De invloed van de auto-industrie heeft uiteindelijk geleid tot een stimulans voor de verkeersveiligheid.

Een andere ontwikkeling is te zien vanaf 1997. In dat jaar is gestart met de EuroNCAP testen. EuroNCAP is een onafhankelijk instituut dat nieuwe modellen auto's test en deze een keurmerk geeft als men aan bepaalde eisen voldoet. Dit is voor de auto-industrie een nieuwe stimulans geweest om veilige auto's te ontwikkelen. Onder invloed van de EuroNCAP testen is de passieve veiligheid van de auto in de laatste jaren steeds verder toegenomen. De passieve veiligheid van een auto is de ingebouwde sterkte die een voertuig ten tijde van een ongeval heeft. Het treedt pas in werking als er een ongeval plaats vindt. De verbeteringen op het vlak van passieve veiligheid hebben geleid tot een afname in de slachtoffers bij ongevallen. Ook in de toekomst moet er door de automobilindustrie aandacht blijven uitgaan naar de passieve veiligheid van auto's. Een ander groot probleem dat zich de laatste jaren steeds meer manifesteert, is de zogenaamde botscomptabiliteit. De tendens is dat voertuigen alsmar zwaarder en hoger worden, zoals de SUV 's, waardoor het onderscheid tussen de kwetsbare en lichtere voertuigen steeds groter wordt (Van Kampen, 2003). In de toekomst is het zaak dat de auto-industrie zich hierop gaat focussen om de botscomptabiliteit gunstiger uit te laten pakken voor de kwetsbare partij.

Behalve de al genoemde passieve veiligheid van auto's is er de laatste jaren steeds meer aandacht besteed aan de actieve veiligheid van auto's. Actieve veiligheid bij een auto omvat een groot aantal aspecten. Zo zijn bijvoorbeeld de wegligging en de vertraging die de remmen van het voertuig kunnen opwekken, aspecten van de actieve veiligheid. Zo is in het bijzonder het op grote schaal toepassen van voorwielaandrijving een belangrijke stap geweest in de verbetering van de wegligging. Deze aandrijfvorm leidt tot een voorspelbaar karakter van het voertuig en draagt bij aan een verhoging van de verkeersveiligheid. Ook de alsmar verbeterende remmen in combinatie met de steeds betere banden hebben gezorgd voor een verbetering van de verkeersveiligheid. Toepassing van ABS (Anti-Blokkeer Systeem) op grote schaal, waarvan gedacht werd dat het een grote invloed zou hebben op de verkeersveiligheid, heeft niet geleid tot een afname van het aantal ongevallen maar wel tot een verschuiving van het soort ongevallen. Meervoudige ongevallen zijn afgenomen terwijl er sprake is van een toename van het aantal enkelvoudige ongevallen. Dit heeft uiteindelijk geleid tot een neutraal effect van ABS op de verkeersveiligheid (Van Kampen et al, 2005, Evans, 1998). De hierboven genoemde actieve veiligheidsmaatregelen betreffen allemaal mechanische aspecten van het voertuig. Er zijn echter ook elektronische systemen die bij kunnen dragen aan een verbetering van de actieve veiligheid van auto's. Deze systemen zijn bezig aan een zeer sterke opmars. Deze zogenaamde ADA-systemen (Advanced Driver Assistance Systems), ondersteunen de bestuurder bij het uitvoeren van de rijtaak. Deze systemen kunnen onder andere de verkeersveiligheid en doorstroming bevorderen door assistentie te geven bij het rijden tussen (smalle) wegbelijning en bij het veilig afstand houden.

Vanaf midden jaren '90 neemt de elektronica een steeds belangrijkere plek in de automobiellndustrie in. Steeds vaker worden elektronische systemen ontwikkeld die de bestuurder van een auto ondersteunen bij het veilig bedienen van het voertuig en zodoende bij dragen aan de actieve veiligheid. Een bekend voorbeeld van een dergelijk systeem is het zogenaamde ESP, Electronic Stability Program. Dit systeem helpt de bestuurder tijdens een noodsituatie te voorkomen dat het voertuig in een slip raakt door het afremmen van een bepaald wiel van het voertuig. Op deze manier ondersteunt het elektronische systeem de automobilist bij het uitvoeren van zijn rijtaak. Deze ondersteuning van de bestuurder heeft grote effecten op de verkeersveiligheid. Voertuigen uitgerust met ESP zijn volgens een Amerikaanse studie tenminste 30% minder vaak betrokken bij dodelijke enkelvoudige ongevallen(ongevallen waarbij maar één voertuig betrokken is en het voertuig bijvoorbeeld van de weg raakt). Bij de zogenaamde SUV 's (Sports Utility Vehicles) is dit effect nog groter. SUV 's welke zijn uitgerust met ESP zijn tot 60% minder vaak betrokken bij enkelzijdige dodelijke ongevallen, dan SUV's die niet uitgerust zijn met ESP. Doordat deze voertuigen een hoger zwaartepunt hebben en hierdoor sneller geneigd zijn om te vallen, heeft een dergelijke elektronische ingreep meer effect. Toch mogen deze resultaten niet meteen als op zich zelfstaande effecten worden beoordeeld (Van Kampen et al, 2005). Doordat ESP voornamelijk geleverd wordt op auto's uit het duurdere marktsegment, die over het algemeen veiliger zijn en waarvan de chauffeurs vaak ouder zijn en meer rijervaring hebben, is een verbetering van de verkeersveiligheid niet alleen toe te wijzen aan de invoering van ESP. Toch zijn de resultaten van ESP veelbelovend en de verwachting is dan ook dat de grootschalige invoering ervan slechts een kwestie van tijd is.

Een ander bekend voorbeeld van een systeem dat kan bijdragen aan de verkeersveiligheid is het zogenaamde ACC, Adaptive Cruise Control. Het systeem is een uitgebreidere vorm van de conventionele cruise control en houdt automatisch afstand tot de voorganger, waarbij het systeem gebruikt maakt van sensoren welke zijn aangebracht in het voertuig, zie ook figuur 2.2. Dit systeem is echter niet als een veiligheidverhogend systeem geïntroduceerd. Het is ontwikkeld om de bestuurder comfortabeler te laten reizen, maar kan onder de juiste omstandigheden een positief effect hebben op de verkeersveiligheid. Het grote voordeel van ACC is dat de volgafstanden vaak groter zijn dan dat de bestuurder uit zichzelf zou aanhouden. ACC heeft echter als nadeel dat de aandacht van de bestuurder kan verslappen doordat hij/zij minder betrokken is bij de rijtaak (Van Kampen et al, 2005, Hoetink, 2003).



Figuur 1.1: Adaptive Cruise Control weergave werking
(Bron: www.sicurauto.it)

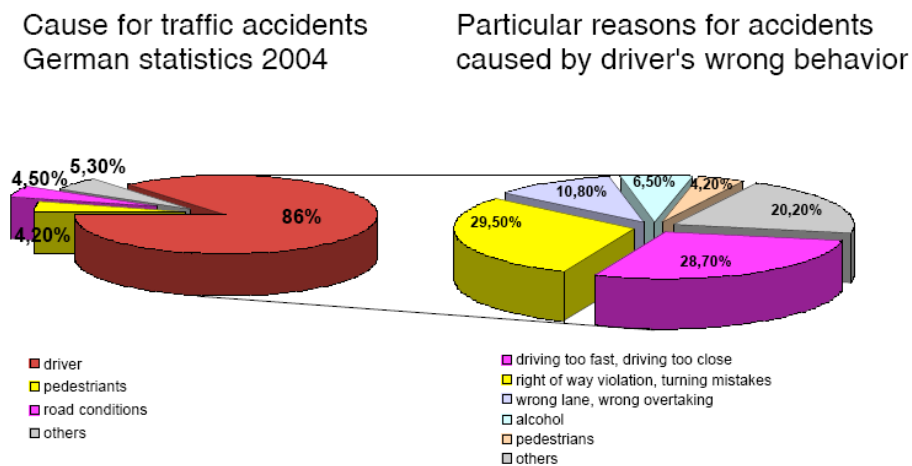
De verwachting is dat ACC-systemen verder worden uitgebreid en de werking ervan verbeterd wordt. Uiteindelijk zal dit leiden tot een systeem dat aanrijdingen kan voorkomen, de zogenaamde CAS, Collision Avoidance Systems. De verwachting is dat deze systemen tot ongeveer 40% kunnen bijdragen aan het voorkomen van kop-staart botsingen. De ontwikkeling voor deze CAS staan op dit moment nog redelijk in de kinderschoenen. Na 2010 wordt verwacht deze ontwikkelingen op grotere schaal te kunnen toepassen.

Een systeem dat meer kan doen dan de bestuurder ondersteunen bij het uitvoeren van zijn rijtaak is ISA (Intelligente SnelheidsAdaptatie). ISA geeft de bestuurder informatie over de maximale snelheid die geldt op een bepaald wegvak. Meer vooruitstrevende vormen van ISA grijpen ook daadwerkelijk in als de bestuurder de geldende maximumsnelheid overtreedt. Dit kan door bijvoorbeeld tegendruk te bieden aan het gaspedaal, wat door de bestuurder nog overruled kan worden. Nog een stap verder vinden we die systemen die daadwerkelijk zelf af remmen en de bestuurder geen mogelijk meer te bieden het voertuig te overrulen. Van een systeem als ISA worden grote effecten verwacht wat betreft verkeersveiligheid. Een groot deel van de ongevallen is te wijten aan te hoge snelheid voor de situatie. Een dergelijk systeem biedt dan ook grote voordelen voor de verkeersveiligheid, zeker als het niet door de bestuurder te overrulen is. De mogelijke verwachte invloed op de verkeersveiligheid varieert van 8% minder doden en gewonden voor de informerende systemen, tot ongeveer 60% minder doden en letselgewonden voor de systemen die daadwerkelijk de bestuurder buitenspel zetten (Van Kampen et al, 2005). Voor invoering van ISA is het noodzakelijk dat de gebruiker, de automobilist, bereid moet zijn om een gedeelte van zijn vrijheid in te leveren en zijn snelheid door ISA te laten bepalen. Het invoeren van ISA stuit daarom nog steeds op veel weerstand.

Een andere categorie ADA-systemen is gericht op het verbeteren van communicatie in het geval van ongevallen. Op basis van Europese regelgeving, betreffende alarmnummers voor noodoproepen, wordt het in de toekomst ook mogelijk om voertuigen uit te rusten met zogenaamde E-call systemen. Deze systemen zorgen ervoor dat de hulpdiensten automatisch gewaarschuwd worden als er een ongeval plaatsvindt. Van deze systemen wordt verwacht dat, net als de andere genoemde ADA-systemen, zij een positieve invloed hebben op de verkeersveiligheid. Doordat hulpdiensten snel gewaarschuwd worden waarbij tevens een exacte plaatsbepaling mogelijk is, kunnen slachtoffers sneller worden geholpen. Door deze snelle hulp kan het aantal slachtoffers en de gevolgen van ongevallen terug worden gedrongen.

1.2 Coöperatieve ADA-systemen

Voortbordurend op veranderingen in de IT zijn er steeds meer methoden om te communiceren en de toepassing van communicatiemiddelen in voertuigen maakt de weg vrij voor een nieuwe groep ADA-systemen. Zo wordt er in de toekomst veel verwacht van zogenaamde coöperatieve ADA-systemen (Bastiaensen & De Hoog, 2000). Coöperatieve ADA-systemen bieden de mogelijkheid om voertuigen onderling te laten communiceren, de zogenaamde vehicle-to-vehicle communicatie (V2V). Een andere vorm van coöperatieve systemen zorgt voor communicatie tussen het voertuig en de infrastructuur, de zogenaamde vehicle-to-infrastructure communicatie (V2I). Door voertuigen onderling te laten communiceren is het mogelijk om informatie over de omstandigheden op de weg uit te wisselen. Een dergelijk systeem kan voor tal van toepassingen gebruikt worden, hier zal echter de nadruk liggen op toepassing van coöperatieve systemen in het kader van de verkeersveiligheid.



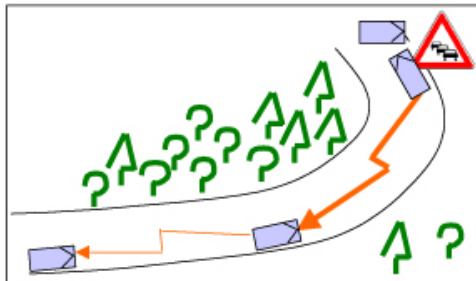
Figuur 1.2: Overzicht ongeval oorzaken Duitsland (Bron: Presentatie WILLWARN, BMW forschung und techniek, AMAA Conference – Berlin 2006)

Uit Duitse ongevalstatistieken (German Federal Statistic Office, 2004) is te herleiden dat ongeveer 86 procent van de ongevallen te wijten is aan het gedrag van de bestuurder. In meer dan een kwart van deze ongevallen is een te hoge snelheid, of een te kleine volgafstand de aanleiding voor een ongeval, zie ook figuur 1.2. Omdat te hoge snelheid en/of te kleine volgafstand een dergelijk grote impact heeft, zou een systeem dat hierop ingrijpt zoals ISA een grote impuls kunnen betekenen voor de verkeersveiligheid. Met name tijdens gevaarlijke omstandigheden als obstakels op de weg, slecht zicht en filevorming is het belangrijk dat bestuurders hun gedrag tijdig aanpassen. Als bestuurders vroegtijdig op de hoogte worden gebracht van eventuele gevaarlijke omstandigheden kunnen zij hun gedrag aanpassen. Door deze vroegtijdige gedragaanpassingen kunnen bestuurder een ongeval mogelijk voorkomen.

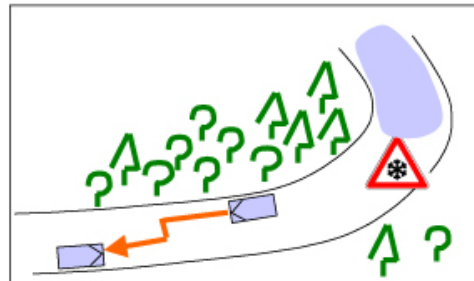
Het onderhavige onderzoek is gericht op een coöperatief systeem dat bestuurders tijdig waarschuwt voor een gevaarlijke situatie verderop op het netwerk. Door de bestuurder vroegtijdig te waarschuwen heeft deze meer tijd om zijn gedrag aan te passen, in het bijzonder zijn snelheid en/of volgafstand. Het coöperatieve systeem dat in dit onderzoek onderzocht zal worden is gebaseerd op vehicle-to-vehicle communicatie. In het kader van een Europees onderzoeksprogramma zijn verschillende partijen bezig met de ontwikkeling van een dergelijk systeem. Het systeem is genaamd

WILLWARN, Wireless Local Hazard Warning. In figuur 2.4 is een kort overzicht gegeven van de mogelijkheden van een dergelijk systeem.

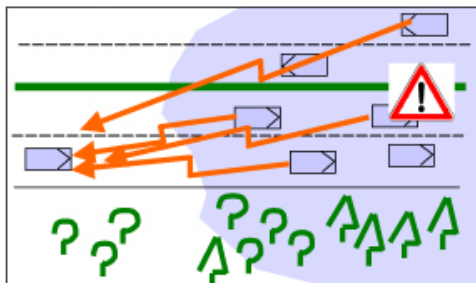
Obstacle behind a curve



Low friction on rural road



Low visibility



Construction area



Figuur 1.3: Local Hazard Warning (WILLWARN), een toekomstig ADA-systeem (Bron: www.prevent-ip.org/en/prevent_subprojects/safe_speed_and_safe_following/willwarn/)

Zoals zichtbaar is in figuur 2.4 worden voertuigen stroomopwaarts gewaarschuwd voor eventuele gevaarlijke situaties die zich op een specifieke locatie voordoen en die door de bestuurder niet te zien is. Door het toepassen van een dergelijk systeem kunnen bestuurders vroegtijdig gewaarschuwd worden en hun rijgedrag aanpassen aan de gevaarlijke situatie verderop. De waarschuwing wordt door de voertuigen onderling verspreid (stroomopwaarts gezien vanuit de plek waar zich een gevaarlijke situatie bevindt). Een nadere beschrijving van het systeem komt aan bod in hoofdstuk 2. In tabel 1.2 is een overzicht weergegeven van de situaties waarvoor WILLWARN de bestuurder kan waarschuwen. Ook deze omstandigheden zullen in hoofdstuk 2 nader worden toegelicht.

Type gevaar	Reden voor gevaar
Eigen auto als obstakel	Stil vallen auto / ongeval met eigen auto
Obstakels op de weg	Ongeval / File – einde / Obstakels op de rijbaan / Langzaam rijdende voertuigen
Verminderde zichtbaarheid	Weer(mist) / invallende duisternis
Verminderde wrijving wegdek	Weer / Vervuiling wegdek
Overige situaties	Spookrijders / Wegwerkzaamheden / Reddingsdiensten

Tabel 1.2: Situaties waarin WILLWARN werkzaam kan zijn

1.3 Doelstelling

De kernvraag achter die uit paragraaf 1.1 en 1.2 naar voren komt is: “ADA-systemen kunnen bijdragen aan de verkeersveiligheid, echter hoe groot is deze invloed?”. Dit onderzoek is opgezet om bij te kunnen dragen aan het beantwoorden van deze vraag en kent de volgende doelstelling:

“Het onderzoek heeft tot doel de werking van WILLWARN te beschrijven en de effecten van het systeem op de verkeersveiligheid te onderzoeken.”

Aan de hand van deze doelstelling zijn een aantal onderzoeksvragen opgesteld welke aan de hand van dit onderzoek beantwoord zullen worden. Hierbij is een onderscheid gemaakt tussen de hoofdvraag en verschillende deelvragen welke bijdragen aan het beantwoorden van de hoofdvraag.

Hoofdvraag:

Wat zijn de effecten van een coöperatief ADA-systeem als WILLWARN op de verkeersveiligheid op netwerkniveau?

Deze hoofdvraag kan in een viertal deelvragen worden onderverdeeld. Hierbij komen de verschillende aspecten van dit onderzoek aan de orde.

Deelvraag 1 (hoofdstuk 2):

- Hoe werkt WILLWARN en onder welke omstandigheden kan het systeem gebruikt worden?
 - Hoe werkt WILLWARN?
 - In welke gevaarlijke situaties is WILLWARN bruikbaar?
 - Wat is het aandeel van deze situaties op de totale hoeveelheid ongevallen?

Deelvraag 2 (hoofdstuk 3):

- Hoe kan WILLWARN en de gevaarlijke situatie goed worden gesimuleerd in een model?
 - Welk netwerk wordt gebruikt om de effecten van het systeem te onderzoeken?
 - Hoe wordt de hazard geïmplementeerd in het simulatiemodel?
 - Welke indicatoren worden gebruikt om de effecten te analyseren?

Deelvraag 3 (hoofdstuk 4 / 5):

- Wat zijn de effecten van invoering van het systeem, op de gesimuleerde situatie?
 - Hoe verhoudt de situatie met ADA-systeem zich ten opzichte van de situatie zonder ADA-systeem?
 - Welke gedragsaanpassing van de bestuurder heeft het meeste effect op de verkeersveiligheid?
 - Wat voor effect is er zichtbaar na aanpassing van de penetratiegraad van het ADA-systeem?

1.4 Leeswijzer

Het uitgevoerde onderzoek kent een aantal belangrijke stappen, het ADA-systeem, het simulatiegedeelte en de analyse van de gegevens. Deze drie onderdelen komen ook in dit rapport terug. In hoofdstuk 2 wordt beschreven hoe het ADA-systeem werkt en in welke situaties het systeem precies werkt. De keuze voor deze situaties wordt ook in dit hoofdstuk nader toegelicht. Hoofdstuk 2 tracht antwoord te geven op deelvraag 1 en 2 uit paragraaf 1.3.

In hoofdstuk 3 komt het simulatieonderzoek aan bod. In dit hoofdstuk wordt aandacht besteedt aan het simulatieonderzoek. De verschillende onderdelen van de simulatie, het netwerk, WILLWARN en de hazard worden nader toegelicht. Ook wordt de onderzoeksmethode toegelicht waarbij de te onderzoeken scenario's centraal staan. Als laatste komen de veiligheidsindicatoren aan bod waarmee veranderingen worden beoordeeld.

Het vierde hoofdstuk bevat de resultaten van het simulatieonderzoek. Als eerste komt aan bod welke analyses de data ondergaan heeft om de scenario's met elkaar te vergelijken. Vervolgens komen de resultaten voor de belangrijkste links in het netwerk aan bod.

In hoofdstuk 5 zijn de conclusies en aanbevelingen opgenomen. Ingegaan wordt op de resultaten van het simulatieonderzoek en de mogelijkheden die WILLWARN biedt voor de verkeersveiligheid. Met aanbevelingen over de gebruikte methode en over de resultaten die dit onderzoek heeft opgeleverd wordt de rapportage afgesloten.

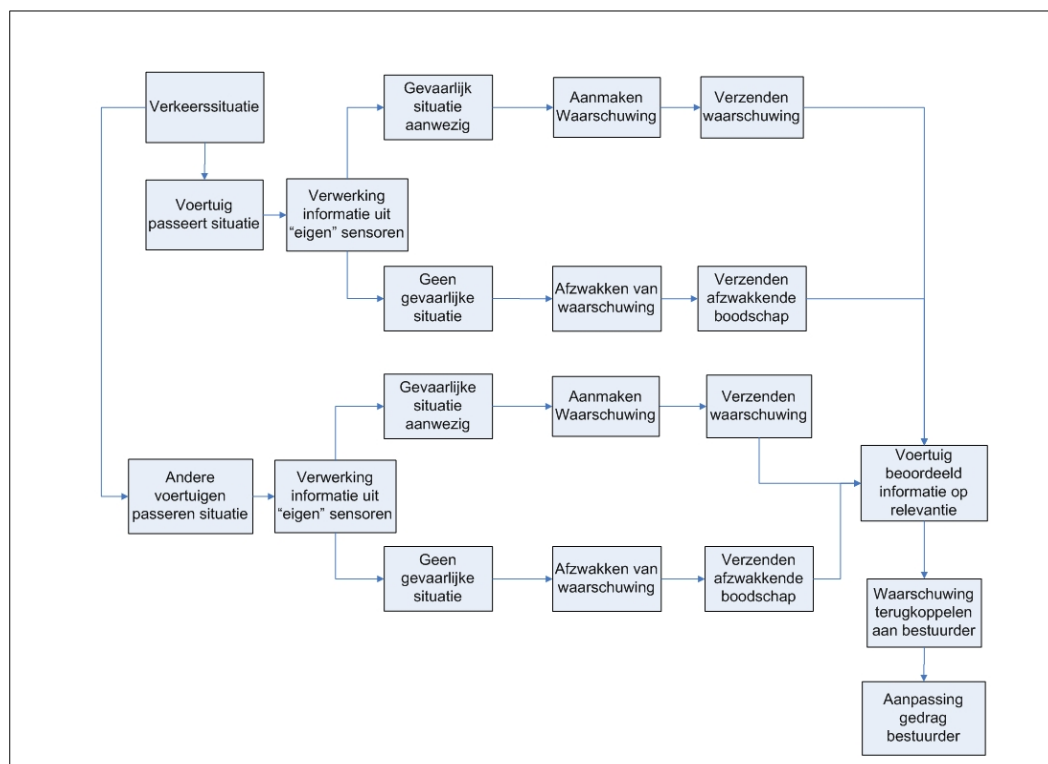
2 Werking “WILLWARN”

Zoals reeds is aangegeven in hoofdstuk 1 zal WILLWARN onderwerp van onderzoek zijn. Het systeem waarschuwt bestuurders vroegtijdig voor gevaarlijke situaties. In dit hoofdstuk zal een beschrijving worden gegeven van de verschillende aspecten van het ADA-systeem. Dit hoofdstuk is opgebouwd uit een zestal paragrafen waarbij paragraaf 1 t/m 5 de werking van het ADA-systeem behandelen. In paragraaf 2.1 is tevens opgenomen hoe het ADA-systeem de gevaarlijke omstandigheden onderscheidt en detecteert. Uiteindelijk zullen de gevolgen van de situaties aan de orde komen waarin WILLWARN werkzaam is.

Het coöperatieve waarschuwingssysteem kan grofweg onderverdeeld worden in een vijftal onderdelen (Straßberger & Adler, 2004). Deze vijf onderdelen zijn:

- individuele situatie analyse;
- coöperatieve analyse van de situatie;
- informatie verwerking;
- verzenden informatie;
- interface met bestuurder (terugkoppeling informatie).

Deze vijf bovenstaande onderdelen vormen de basis voor WILLWARN, dat op basis van voertuigdynamica en logische combinaties van parameters gevaarlijke omstandigheden herkent. In figuur 2.1 is de werking van WILLWARN schematisch weergegeven. In de volgende paragrafen zullen de vijf stappen nader worden toegelicht.



Figuur 2.3: Werking WILLWARN in schema vorm, eigen bewerking

2.1 Individuele situatie analyse

Om voertuigen te kunnen waarschuwen voor gevaarlijke omstandigheden is het noodzakelijk dat deze omstandigheden door individuele voertuigen gedetecteerd kunnen worden. Gevaarlijke situaties kunnen aan de hand van verschillende parameters worden herkend. Deze parameters kunnen gedetecteerd worden door sensoren in het voertuig. Ieder voertuig uitgerust met het systeem maakt zo een voortdurende analyse van de omgeving waar hij doorheen rijdt. Mochten de sensoren in het voertuig een onverwachte situatie constateren (bijv. plotselinge afwijkingen in de laterale en /of longitudinale krachten), dan kan dit bijv. duiden op een obstakel op de weg. Uiteraard zijn dit niet de enige parameters waaraan het systeem eventuele gevaarlijke situaties kan herkennen. Zo is bijvoorbeeld ook het inschakelen van de ruitenwissers bij temperaturen onder 0° Celsius een indicatie voor mogelijke gladheid. In de komende paragrafen zal de individuele situatie analyse voor de vier situaties van WILLWARN nader worden toegelicht.

In paragraaf 1.2 zijn vier situaties genoemd die een gevaar kunnen betekenen voor de verkeersveiligheid. Iedere situatie heeft zijn eigen kenmerken en parameters waaraan deze te herkennen is. Gecombineerd met enkele parameters die de context beschrijven, kan er een beeld worden gevormd van de specifieke situatie. In tabel 2.1 is een overzicht weergegeven hoe de vier situaties gedetecteerd kunnen worden. In de volgende vier subparagrafen zal kort worden toegelicht aan de hand van welke parameters de verschillende situaties gedetecteerd en herkend kunnen worden.

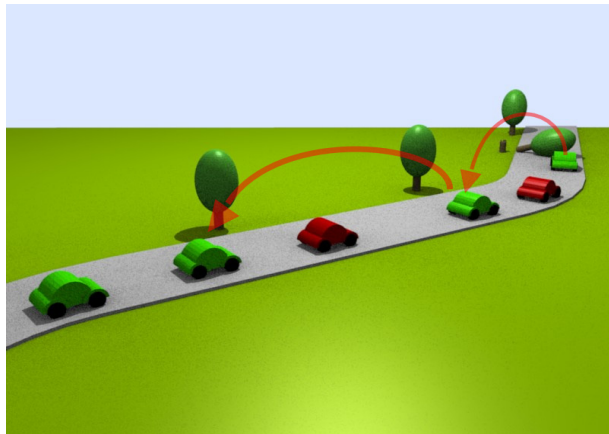
Gevaarlijke situatie/Hazard	scenario	Detectie	
		In-car sensors	Infrastructuur
Slecht zicht	Verminderd zicht	Regensensor, ruitenwisser aan/uit, snelheid ruitenwisser, mislichten voor/achter, lichtsensoren, temperatuursensor, snelheid, deceleratie; Logische combinatie van deze data	Weersberichten, Traffic Management System
Gladheid	Verminderde wrijving	ESP / ABS / ASR data combineren snelheid, acceleratie/decelaratie, "slingerhoek", temperatuur, regensensor (ruitenswissers), tijd/datum; Logische combinatie van deze data	Weersinformatie, Traffic Management system
Obstakels	Obstakels op de weg	ESP / ABS /ASR-data analyse (dynamisch voertuig gedrag), snelheid, acceleratie waarden, "slingerhoek", stuurhoek, hoeksnelheid, ACC data	Verkeersinformatie
Verkeer	Wegwerkzaamheden	Snelheid, langzaam rijdende voertuigen op kleine afstand, deceleratie	"Zenders" bij wegwerkzaamheden

Tabel 2.1: Overzicht detectiemethoden van hazards door WILLWARN (Eigen bewerking naar: D22.35 Link to ProFusion, Hilt & Noecker, 2004)

2.1.1 Obstakels

Het detecteren van obstakels op de weg heeft een betrekking op vele verschillende parameters. Dit blijkt uit tabel 2.1. In het bijzonder informatie uit het ESP (Electronic Stability Program) systeem van een voertuig is van groot belang bij het detecteren van obstakels. De voertuigdynamica wordt door het ESP bewaakt. Als er sprake is van plotselinge afwijkingen in deze waarden kan dit duiden op een gevaarlijke situatie. Het systeem beoordeelt de input die de bestuurder geeft aan het voertuig (stand gaspedaal, stuuruitslag, mate van remmen), met de reactie die het voertuig geeft. Als dit van elkaar afwijkt, dan zal er in veel gevallen sprake zijn van slippende wielen of onder-, en overstuur. Het ESP – systeem kan hierbij de bestuurder ondersteunen door gerichte ingrepen te doen op de remmen of het vermogen van het voertuig.

Als WILLWARN een ingreep bemerkt van het ESP systeem, dan kan er sprake zijn van obstakels op de weg. Als de parameters die het ESP systeem meet, lijken op een uitwijkmanoeuvre wordt door de WILLWARN module een waarschuwing verzonden. Deze waarschuwing bevat dan tevens de gegevens over de aard van het gevaar, in dit geval dus een obstakel op de weg. Niet alleen de informatie die het ESP levert kan van belang zijn. Steeds vaker zijn voertuigen uitgerust met ACC (Advanced Cruise Control), wat gebruikt maakt van sensoren aan de voorkant van het voertuigen. Als deze sensoren een obstakel opmerken zullen ze het voertuigen vertragen. Als de informatie van het ESP – systeem en de informatie uit de sensoren van het ACC gecombineerd worden kunnen waarschuwingen nauwkeuriger worden gegeven.



Figuur 2.1: Detectie gevaarlijke obstakels en het verzenden van deze informatie aan andere bestuurders op het netwerk (J. Thalen, afbeelding in het kader van project “Auto in de Toekomst” 2007)

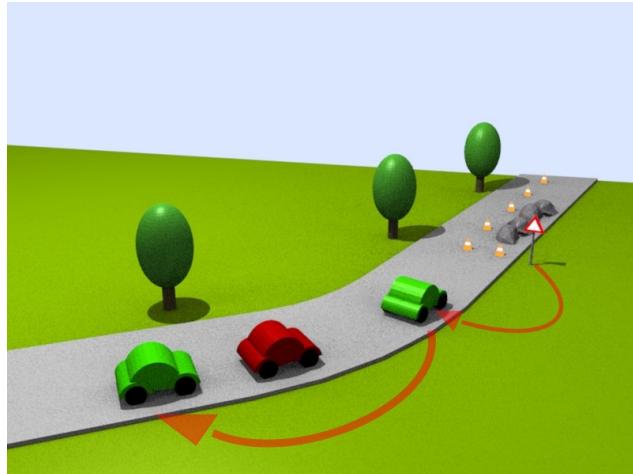
2.1.2 Verminderd zicht

Een zeer gevaarlijke situatie die voorkomt op de weg is mist of verminderd zicht. Ook in dit geval kan WILLWARN waarschuwen voor eventuele mistbanken op het netwerk. Om te kunnen waarschuwen voor “verminderd zicht” is het noodzakelijk dat deze omstandigheden ook als zodanig herkend worden. In het geval van beperkt zicht zijn er specifieke kenmerken die het mogelijk maken om deze omstandigheden te detecteren. Nieuwe auto's worden steeds vaker uitgerust met automatische licht-, en regensensors om zowel het licht als de ruitenwissers automatisch in te schakelen. Als beide sensoren detecteren dat het noodzakelijk is om het licht en de ruitenwissers aan te zetten, dan kan er sprake zijn van verminderd zicht (donkere omstandigheden, mist bestaat uit waterdruppels). Echter niet alleen het gewone licht en ruitenwissers zijn bepalend voor het genereren van een waarschuwing voor beperkt zicht. Ook het gebruik van mistlampen zowel voor als achter, is een zeer sterke indicatie voor omstandigheden met verminderd zicht. Probleem hierbij is dat er door bestuurders vaak een verkeerde inschatting wordt gemaakt over het wel en niet voeren van mistlichten. Dit kan mogelijk leiden tot het verzenden van niet gewenste meldingen. Doordat een enkele melding minder betrouwbaar is, is het noodzakelijk dat dergelijke meldingen gevalideerd worden. De betrouwbaarheid van meldingen kan toenemen doordat meerdere voertuigen dezelfde omstandigheden tegen komen. Dit komt nader aan de orde in paragraaf 2.2, waarin de coöperatieve situatie analyse centraal staat.

2.1.3 Wegwerkzaamheden

Het detecteren van wegwerkzaamheden is in tegenstelling tot de overige situaties nagenoeg onmogelijk met behulp van onboard sensoren. Het rijden in wegwerkzaamheden wijkt vaak niet af van het rijden onder normale omstandigheden (m.u.v. de snelheid). Het detecteren van deze situaties is dan ook zeer moeilijk. Voor het detecteren van wegwerkzaamheden kan dan ook niet gewerkt worden met logische combinaties van verschillende parameters.

Om toch wegwerkzaamheden als zodanig te kunnen herkennen kan gewerkt worden met zogenaamde “bakens” (zie ook figuur 2.2). Aan het begin van de wegwerkzaamheden worden deze bakens geplaatst welke een signaal uitzenden dat gelijk is aan de signalen die uitgeruste voertuigen uitzenden. Voertuigen herkennen het signaal als een gevaarlijke situatie en geven de bijbehorende waarschuwing door aan de bestuurder. Wegwerkzaamheden hoeven nu dus niet door de voertuigen zelf gedetecteerd te worden maar worden door “slimme” infrastructuur kenbaar gemaakt. Voor het overige geldt hierbij hetzelfde als bij de andere situaties en worden de gegevens op gelijke wijze verzonden.



Figuur 2.2: Afwijkende detectie van wegwerkzaamheden, waarbij de infrastructuur bijdraagt aan het detecteren en verzenden van de noodzakelijke informatie (J. Thalen, afbeelding in het kader van project “Auto in de Toekomst” 2007)

2.1.4 Gladheid

Voor het detecteren van gladheid kan gebruik worden gemaakt van een logische combinatie van verschillende parameters. Zo mag men er van uitgaan dat werkende ruitenwisser in combinatie met een temperatuur onder het vriespunt kan leiden tot gladheid. Toch zijn er ook nog andere parameters waaraan eventuele gladheid kan worden bepaald. Zo kan er aan de hand van het ESP (en ABS) gemeten worden of er sprake is van slippende wielen van het voertuig. Ook is hierbij de stuurhoek die het voertuig op dat moment heeft een indicatie voor eventuele gladheid. Dit in combinatie met de eerder genoemde temperatuur kan duidelijk weergeven of er sprake is van gladheid. De temperatuur van de omgeving is vrij eenvoudig te meten met een onboard temperatuur meter.

Uiteindelijk kan uit een logische combinatie van de bovenstaande parameters worden afgeleid of er sprake is van glad wegdek. Het detecteren van gladheid is echter één van de moeilijkere onderdelen van dit coöperatieve systeem. Aan de hand van enkele belangrijke parameters kan gladheid vrij eenvoudig worden opgespoord. Echter is hier een beperking aan. Ieder voertuig heeft specifieke kenmerken waardoor de een gevoeliger is voor gladheid dan een ander voertuig (bijv. de staat van de banden). In het geval van gladheid moet de relevantie van de waarschuwingen dan ook hoog zijn en zou een waarschuwing lang opgeslagen moeten worden, om zodoende toch voldoende voertuigen van het gevaar op de hoogte kunnen te stellen.

2.2 Coöperatieve situatie analyse

Op basis van de gegevens uit de individuele situatie analyse kan een gevaarlijke situatie worden herkend. Echter in het verkeer is het gebruikelijk dat binnen korte tijd meerdere voertuigen eenzelfde omstandigheid ondervinden. Als al deze voertuigen eenzelfde gevaarlijke omstandigheid ondervinden en herkennen, maakt dit dat de waarschuwing relevanter en noodzakelijker is. Het tegenovergestelde is natuurlijk ook waar. Een waarschuwing op basis van de karakteristieken van één enkel voertuig is mogelijk gebaseerd op een incidenteel voorkomende situatie (bijv. overstekend wild) waardoor mogelijk een waarschuwing zou uitgaan, terwijl deze voor achteropkomend verkeer veel minder relevant is. Het verkeer dat een gemelde gevaarlijke situatie passeert heeft hierin natuurlijk ook een functie. Als meerdere voertuigen geen gevaarlijke situatie meer herkennen, kan dit inhouden dat er geen sprake meer is van een gevaarlijke situatie en dat de waarschuwing kan komen te vervallen. Dit is een proces dat doorlopend plaats vindt. De waarschuwing zal steeds meer zijn relevantie verliezen tot op een punt waarop de waarschuwing niet relevant meer is en zal vervallen.

Door hierbij gebruik te maken van de informatie van meerdere voertuigen wordt een duidelijker beeld verkregen van de omstandigheden. Op basis van de informatie die meerdere voertuigen verzamelen / verzenden kan een waarschuwing aan relevantie winnen of juist relevantie verliezen. Het is dus noodzakelijk dat de voertuigen onderling informatie uitwisselen. Informatie verkregen uit het eigen voertuig moet dus getoetst worden aan de informatie die van andere voertuigen is verkregen.

2.3 Informatie verwerking

De informatie die in het voertuig samenkomt, zowel uit de eigen sensoren als informatie die is verzonden door andere voertuigen moet verwerkt worden, waarna er eventueel actie ondernomen kan worden. Voor de informatie die ontvangen wordt kan een tweeledig onderscheid gemaakt worden: informatie die daadwerkelijk aangeeft dat er sprake is van nieuwe gevaren of informatie die een bekende waarschuwing versterkt, bevestigt of afzwakt. Deze twee verschillende categorieën kunnen nog verder verdeeld worden in plaatselijke informatie (punt), informatie die van belang is voor een wegvak (lineair) en informatie die betrekking heeft op een geheel gebied. Om het "WILLWARN" zo goed mogelijk te kunnen laten functioneren en de bestuurder alleen waar nodig te informeren is het noodzakelijk dat de informatie zo efficiënt mogelijk verwerkt wordt, zodat snel en adequaat, betrouwbare waarschuwingen aan de bestuurder gegeven kunnen worden. Waarschuwingen van het "WILLWARN" zijn vaak beperkt tot een beperkt gebied rondom de voertuiglocatie. Dit biedt al een mogelijkheid om de informatie te toetsten op relevantie en zodoende op efficiënte manier te informatie te verwerken. Regelalgoritmen voor het beoordelen van informatie en het verwerken kunnen hierdoor op zeer efficiënte wijze worden gebruikt. Om het systeem nog efficiënter te kunnen laten werken zou een mogelijke uitbreiding met digitale kaarten een ideale situatie zijn. Zodoende kan de relevantie van waarschuwingen nog sneller getoetst worden.

2.4 Verspreiding informatie

Een van de belangrijkste onderdelen van coöperatief veiligheidssysteem is de manier waarop informatie verspreid wordt aan voertuigen in de nabije omgeving. Voor het verzenden van informatie wordt gebruikt gemaakt van zogenaamde Ad-Hoc netwerken, welke zich vormen als voertuigen onderling informatie verzenden. Ondanks de toepasbaarheid van dergelijke netwerken kunnen deze netwerken meerdere problemen opleveren. Aan de hand van twee extreme situaties kunnen enkele van deze problemen duidelijk worden gemaakt.

- In het geval van een zeer geringe verkeersdichtheid (weinig WILLWARN voertuigen) is de communicatie tussen voertuigen beperkt. Ook de afstand waarover een individueel voertuig informatie kan verzenden is beperkt. In dit geval dienen waarschuwingen opgeslagen te worden en via fysieke wijze verplaatst te worden totdat deze aan andere voertuigen verzonden kunnen worden. De waarschuwing wordt alleen door gegeven aan andere voertuigen, als deze zich binnen het “relevante gebied” rond de hazard bevinden. Indien er binnen dit gebied geen waarschuwing verzonden is neemt de relevantie van de waarschuwing zodanig snel af dat deze niet meer verzonden wordt.
- In de tweede situatie is er sprake van een zeer hoge verkeersdichtheid (veel WILLWARN voertuigen). Hierbij zal er zoveel communicatie plaats vinden tussen de voertuigen dat er sprake kan zijn van overbelasting van de beschikbare bandbreedte. Eventuele belangrijke waarschuwingen kunnen nu verloren gaan. Een goede coördinatie van het verzenden van informatie is dan ook noodzakelijk. Met behulp van een algoritme dat de relevantie van de waarschuwingen beschrijft is dit probleem op te lossen.
- De veiligheid van de netwerken moet worden gewaarborgd. Net als bij een normaal wireless netwerk moet het netwerk zodanig beveiligd zijn dat er niet door derden “ingebroken” kan worden op het netwerk. Zo kan het netwerk niet gebruikt worden voor andere doeleinden dan waarvoor het eigenlijk bedoeld is.

Voor het verzenden van relevante waarschuwingen is een goede prioritering van waarschuwingen noodzakelijk. Door toepassing van een prioteringsstrategie komen alleen die waarschuwingen aan bij een bestuurder die daadwerkelijk relevant zijn. De tijd die verstrijkt tussen het ontvangen van een waarschuwing en de terugkoppeling aan de bestuurder wordt hiermee tevens beperkt. Ook voor meerdere relevante waarschuwingen die gelijktijdig binnen komen is het noodzakelijk dat er een goede prioteringsstrategie wordt opgesteld.

De tijd waarbinnen de waarschuwingen verzonden kunnen worden is door de constante bewegingen van voertuigen sterk beperkt. De omvang van de data dient dus beperkt te worden om snel en gerichte waarschuwingen te kunnen verzenden. Op deze wijze wordt de bandbreedte van het netwerk optimaal benut en worden alleen die waarschuwingen verzonden die voor het gebied de grootste invloed hebben.

2.5 Interface bestuurder

Als de omstandigheden gedetecteerd zijn en de waarschuwingen zijn verzonden naar voertuigen in het gebied is er nog een laatste stap in het operationeel maken van een “WILLWARN”. De waarschuwingen dienen teruggekoppeld worden naar de bestuurder. In de voorafgaande onderdelen van het systeem is al onderzocht of de waarschuwingen voor de bestuurder relevant zijn. Als duidelijk is welke waarschuwing(en) voor de bestuurder relevant is/zijn dan kan de bestuurder hierover geïnformeerd worden. Belangrijk hierbij is dat de bestuurder niet afgeleid wordt van het uitvoeren van de rijtaak en hij zich volledig kan richten op het verkeer. In het geval van meerdere relevante waarschuwingen is het noodzakelijk dat deze op basis van prioriteit worden doorgegeven aan de bestuurder. Zodanig dat de voor de bestuurder meest relevante waarschuwing als eerste wordt doorgegeven.

Om de bestuurder daadwerkelijk op de hoogte te stellen van de waarschuwingen zijn meerdere mogelijkheden. Er kunnen in grote lijnen een drietal vormen worden onderscheiden:

- Visueel;
- Akoestisch;
- Haptisch.

In het geval van visuele waarschuwingen kan gebruik worden gemaakt van een display in het dashboard, akoestische signalen kunnen afgespeeld worden via de muziek installatie in het voertuig en haptische signalen kunnen als trillend stuur of tegendruk in het gaspedaal worden verwerkt. Uiteraard zijn ook combinaties van deze drie uitingsvormen mogelijk in een definitief ontwerp. Op basis van deze waarschuwingen kan de bestuurder zelf zijn gedrag aanpassen. Hierbij werkt het systeem alleen informierend. De bestuurder heeft zelf de keuze hoe hij zijn gedrag aan past. De verantwoordelijkheid blijft op deze manier bij de bestuurder liggen. Het is wel mogelijk om de bestuurder een advies mee te geven hoe hij zijn gedrag het beste kan aanpassen. In dit onderzoek zal deze vorm van het systeem worden onderzocht, waarbij de aanpassing van het gedrag bij de bestuurder ligt.

In het bovenstaande gaat het steeds over een “vrijwillige” actie van de bestuurder van het voertuig, naar aanleiding van een waarschuwing. Het zal in de toekomst echter ook mogelijk worden om het systeem autonoom te laten ingrijpen. Als het voertuig een waarschuwing heeft ontvangen wordt deze omgezet in een actie. Het voertuig past autonoom zijn snelheid aan, vergroot zijn volgafstand enz. De bestuurder heeft hierbij niet meer de mogelijkheid om het systeem te overrulen. Het grote probleem bij een niet overrulebaar systeem is echter dat er voldoende draagkracht moet zijn onder bestuurders. De verwachting is dat een niet-overrulebaar systeem voorlopig nog niet voldoende draagkracht zal hebben. In dit onderzoek wordt dan ook gewerkt met een systeem dat de bestuurder alleen adviseert.

2.6 Verantwoording Situaties

In voorgaande paragrafen zijn de situaties beschreven waarin WILLWARN werkzaam is. Ook is weergegeven hoe deze gevaarlijke situaties gedetecteerd kunnen worden en hoe de informatie verzonden kan worden. In deze paragraaf zal kort worden verantwoord waarom de ontwikkelaars van WILLWARN voor deze vier situaties gekozen hebben.

Zoals al gebleken is in paragraaf 2.1 is WILLWARN werkzaam in een viertal situaties. In de onderstaande opsomming zijn deze vier situaties nogmaals opgenomen:

- obstakels op de weg
- vermindering van het zicht (bijv. mist)
- gladheid (bijv. opgevroren weggedeelten)
- wegwerkzaamheden

De keuze voor bovenstaande vier situaties is niet willekeurig. In het verkeer komen tientallen, zonet honderden gevaarlijke situaties voor welke een bepaalde invloed hebben op de verkeersveiligheid. De keuze voor deze vier situaties is dan ook als volgt te verantwoorden: de kenmerken die deze situaties zo specifiek maken, zijn met behulp van in-car sensors op vrij eenvoudige wijze te detecteren. Sensoren die toegepast worden in hedendaagse voertuigen bieden de mogelijkheid om deze situaties te herkennen. Dit maakt het mogelijk dat andere voertuigen gewaarschuwd worden voordat zij zelf in een dergelijke situatie terecht komen. Doordat er gebruik wordt gemaakt van deze aanwezige

sensoren is het mogelijk om met beperkte financiële middelen de verkeersveiligheid te verhogen. Deze sensoren zijn toch al aanwezig in voertuigen voor allerlei regelsystemen. Uitbreiding van deze systemen met een “WILLWARN” is verhoudingsgewijs een beperkte investering. Deze gevaarlijke omstandigheden zijn met behulp van de huidige techniek in voertuigen te detecteren zonder de kosten van voertuigen meteen de hoogte in te jagen.

Uit de Nederlandse database voor ongevallenregistratie van het SWOV blijkt dat genoemde vier omstandigheden in totaal in ongeveer 5,20% van de ongevallen als oorzaak wordt gezien. Deze 5,20% is gebaseerd op onderstaande verdeling van de verschillende situaties:

- Glad wegdek → 2,18 % van ongevallen
- Werk in uitvoering → 1,78 % van ongevallen
- Verminderd zicht → 0,77 % van ongevallen
- Obstakels → 0,43 % van ongevallen

Het probleem bij deze percentages is echter dat in 5,20% van de ongevallen deze vier situaties gezien worden als de oorzaak van het ongeval. Deze situaties op zich zelf zijn niet de oorzaak van een ongeval. Meestal is het onaanangepaste gedrag van de bestuurder dat leidt tot een ongeval. Uit de statistieken is dit echter niet te herleiden. Mogelijk is er in een groter percentage van de ongevallen sprake van een van deze vier situaties wat niet te herleiden is uit de database. Als dit wordt vergeleken met de gegevens uit figuur 2.3, dat blijkt dat er een groot verschil is tussen beide benaderingen. Het rangschikken van de vier scenario's op basis van deze beperkte gegevens is dus nagenoeg onmogelijk. De gegevens uit de Nederlandse database geven wel een ondergrens van het aantal ongevallen aan. Terwijl de Duitse gegevens (BMW Forschung und technik, 2006) een soort van bovengrens aangeven. Door een systeem te ontwikkelen dat bestuurders tijdig waarschuwt kan in het meest gunstigste geval een verbetering optreden van de verkeersveiligheid in de orde van grootte van 20 – 28% (zie ook figuur 1.2). Indien WILLWARN goed werkt kan dit in de praktijk dus een aanzienlijk effect hebben op de verkeersveiligheid.

3 Simulatie omschrijving

In dit hoofdstuk zal een omschrijving worden gegeven van de simulatie en de instellingen die toegepast zijn in de simulatie. In de eerste paragraaf wordt uitleg gegeven over de situatie en de hazard die gesimuleerd zal worden. Vervolgens komt aan de orde welk simulatieprogramma gebruikt is en hoe WILLWARN hierin is geïmplementeerd. In paragraaf 3 komt de gedragsverandering van de bestuurder aan de orde, gevolgd door de onderzoeksmethode in paragraaf 4. Als laatste wordt aandacht besteedt aan de indicatoren waarmee de effecten worden beoordeeld.

3.1 Netwerk

Het netwerk dat toegepast zal worden in de simulatie komt in onderstaande twee paragrafen aan bod. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de hazard welke in het netwerk is opgenomen, waarbij rekening is gehouden met de verschillende situaties genoemd in paragraaf 2.6. Ten tweede zal in deze paragraaf gekeken worden naar de hoeveelheden verkeer op het netwerk, de afmetingen en snelheden welke gereden zullen worden op het netwerk.

3.1.1 Hazard

Voor het onderzoeken van de effecten van WILLWARN is het noodzakelijk dat er een netwerk wordt opgezet waarin een hazard is opgenomen. Introductie van een hazard leidt ertoe dat voertuigen in een gevaarlijke situatie worden gebracht. Als de vier situaties waarin het systeem werkt, obstakels, verminderd zicht, gladheid en wegwerkzaamheden nader bekeken worden, dan blijkt dat alle vier de situaties een “obstakel” in zich hebben. Bestuurders kunnen de situatie niet voorbij zonder hun snelheid aan te passen. Voor het simulatieonderzoek is dan ook besloten om een obstakel te introduceren op het netwerk. Door dit obstakel komen bestuurders in een situatie terecht waarin zij mogelijk hun gedrag niet / te laat aanpassen aan de veranderende omstandigheden. Het obstakel dat gesimuleerd zal worden is geen fysiek obstakel. Om een onvoorziene omstandigheid te introduceren is gebruik gemaakt van een kunstgreep. In het netwerk is een enkele link opgenomen met een zéér lage maximum snelheid (15 km/u) in vergelijking met de andere links (80 km/u). Hierdoor wordt de praktijk nagebootst waarin voertuigen een obstakel wel veilig kunnen passeren mits zij hun gedrag aanpassen. Doordat deze link, met verlaagde max. snelheid, wordt voorafgegaan door twee korte links met een maximumsnelheid van 80 km “zien” bestuurders de hazard pas op het allerlaatste moment. Dit leidt tot gevaarlijke situaties waarin voertuigen zeer sterk vertragen en er sprake kan zijn van een schokgolf. De gevaarlijke situaties genoemd in paragraaf 2.6 leiden in de praktijk vaak tot vergelijkbare omstandigheden. Wat uiteindelijk kan leiden tot het hoge percentage ongevallen van 20-25%.

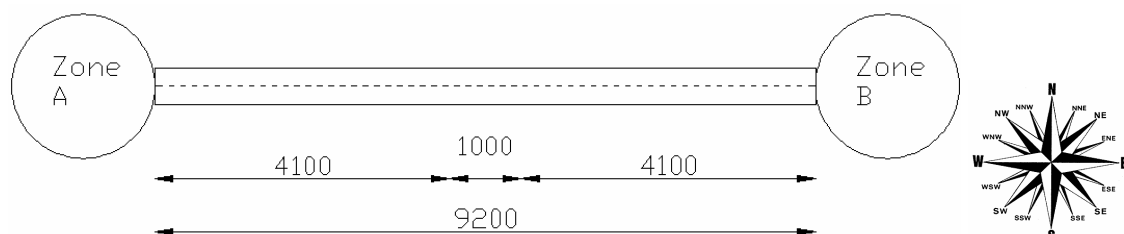
Uit paragraaf 2.1, blijkt dat WILLWARN gevaarlijke situaties detecteert aan de hand van logische combinaties tussen verschillende parameters. Deze werkwijze is in dit simulatieonderzoek niet toegepast. Het detecteren van de hazard is op een andere wijze opgelost. Voertuigen detecteren de hazard als ze een “detector” passeren aan het begin van link 9. Deze detector bevindt zich helemaal aan het begin van de link waarop de snelheid vanaf minuut 25 verlaagd wordt. Als het eerste voertuig met WILLWARN de detector passeert is de hazard gedetecteerd. Vanaf het moment dat dit eerste voertuig de detector passeert start deze ook met het verzenden van waarschuwingen aan de andere voertuigen op het netwerk. Op basis van deze waarschuwing zullen andere voertuigen (uitgerust met het systeem) hun gedrag gaan aanpassen. Dit is in vergelijking met de praktijk ook voor de hand liggend. Ook in een praktijksituatie zal het “eerste” voertuig dat een hazard passeert niet gewaarschuwd kunnen worden. Indien een WILLWARN voertuig de hazard passeert dan zal deze in 100% van de gevallen deze hazard detecteren. In de praktijk kan het voorkomen dat voertuigen de hazard niet detecteren. Echter omdat er geen duidelijk beeld is van de procentuele fout die in de

sensoren en in de detectiemiddelen aanwezig is kan hier geen rekening mee worden gehouden. Mogelijk leidt het ontbreken van deze fouten tot een positieve overschatting van de resultaten op de verkeersveiligheid.

De hazard is niet gedurende de hele simulatierun (60min.) aanwezig op het netwerk. In minuut 25 is er sprake van een verlaagde snelheid op link 9. Na tien minuten (minuut 35) verdwijnt de hazard weer. Vanaf dit moment heeft link 9 weer een max. snelheid van 80 km/u. De detector die aangeeft dat er sprake is van een hazard geeft nu aan dat de hazard weer verdwenen is. Als een voertuig met WILLWARN nu de detector passeert registreert deze dat er geen hazard meer is en worden de waarschuwingen opgeheven. Vervolgens wordt een bericht verzonden aan de andere voertuigen op het netwerk dat zij hun gedrag niet verder hoeven aan te passen. Waarna alle voertuigen hun normale gedrag weer aannemen.

3.1.2 Wegvak

Het netwerk dat ontworpen is om het ADA-systeem te onderzoeken is bewust beperkt van omvang. Omdat de nadruk ligt op het onderzoeken van de gevolgen van de verkeersveiligheid kon ontstaan worden met een eenvoudig netwerk. Voor het onderzoeken van de effecten van WILLWARN op de verkeersveiligheid is een eenvoudig netwerk voldoende. De indicatoren die gebruikt worden in dit onderzoek (paragraaf 3.5) bieden deze mogelijkheid. Besloten is om niet te werken met een “echt” netwerk maar gebruik te maken van een recht wegvak. Het toegepaste netwerk is opgebouwd uit twee zones van waaruit verkeer vertrekt. Deze zones zijn onderling verbonden door een recht wegvak met een totale lengte van negen kilometer. Dit wegvak heeft in iedere richting één rijstrook waarbij de normale maximumsnelheid in beide richtingen 80km/u bedraagt (zie ook figuur 3.1). Het idee hierachter is om een weg buiten de bebouwde kom te simuleren. Bestaande ADA-systemen zijn vaak gericht op voertuigen die zich op de autosnelweg bevinden. Omdat WILLWARN niet alleen gericht is op het hoofdwegenet is besloten om te onderzoeken welke effecten het systeem heeft bij een lagere maximumsnelheid.



Figuur 3.1: Overzicht netwerk, totale lengte netwerk 9200m. De hazard ontstaat op 4100m. In dit onderzoek wordt alleen de zuidelijke rijstrook onderzocht (west-oost)

Op het netwerk wordt een vooraf vastgestelde hoeveelheid voertuigen geplaatst. Deze voertuigen worden in een viertal perioden op het netwerk geplaatst. De simulatie is in een viertal perioden verdeeld om de hazard “plotseling” te kunnen introduceren. Hiermee wordt de praktijk het sterkst benaderd. Door in de eerste periode nog geen hazard te introduceren ontstaat er ook een stabiele situatie op het netwerk. Om de intensiteiten op het netwerk vast te kunnen stellen zijn meerdere proefruns uitgevoerd met variërende intensiteiten. Op basis van een optische beoordeling van de verschillende simulaties is besloten om de hoeveelheid verkeer op te onderzoeken richting van het netwerk op 1100 vtg/h vast te stellen, zie ook tabel 3.1.

- Indien de hoeveelheid verkeer groter werd dan 1100 vtg/h dan nam de hoeveelheid stilstaande voertuigen tijdens de simulatie zeer sterk toe. Doordat de voertuigen tijdens de simulatie plotseling sterk vertragen voor de hazard ontstaat en een schokgolf op het netwerk. Deze schokgolf zorgt ervoor dat steeds meer voertuigen sterk vertragen en uiteindelijk tot een grote hoeveelheid stilstaande voertuigen. Voor het beoordelen van de effecten van het ADA-systeem is dit een ongewenste situatie. Bij een hogere intensiteit is er sprake van filevorming. Door deze filevorming ontstaat er een wachtrij voor de hazard. Door deze wachtrij neemt het aantal gevaarlijke situaties door de hazard af. Ook is door de lage snelheden die in dit geval optreden ter plekke van de hazard geen verschil meer waar te nemen tussen WILLWARN voertuigen en normale voertuigen.

- Een kleine intensiteit is ook niet wenselijk. Weinig voertuigen betekent in dit geval ook een sterke afname van de informatie die verzameld wordt. Bijkomend nadeel is dat een verlaging van de intensiteit ook effect heeft op de verkeersveiligheid. Doordat er minder voertuigen gedurende dezelfde tijdsperiode op het netwerk worden geplaatst, worden de onderlinge volgfstanden groter. Hierdoor zullen eventuele gevaarlijke situaties veel minder vaak optreden. Als laatste kan een kleine intensiteit gevolgen hebben voor de werking van het systeem. Zeker in combinatie met een kleine penetratiegraad bestaat de mogelijkheid dat voertuigen zeer laat een waarschuwing van WILLWARN ontvangen omdat de hazard nog niet gedetecteerd is. In dit onderzoek is ook dit niet wenselijk. Voor een eventueel vervolgonderzoek is het wel aan te raden deze omstandigheden ook onder de loep te nemen.

In deze paragraaf kwam reeds aan de orde dat het netwerk gevormd wordt door een wegvak met één rijstrook in twee richtingen (figuur 3.1). Voor de strook in oostelijke richting is al nader verklaard waarom de intensiteit 1100 vtg/h bedraagt. Voor het bepalen van de intensiteit in westelijke richting zijn geen proefruns uitgevoerd. De rijstrook in westelijke richting is van ondergeschikt belang in dit onderzoek. Voor het snel verzenden van waarschuwingen door WILLWARN wordt ook gebruik gemaakt van tegemoetkomend verkeer. Hiervoor hoeft de intensiteit op deze verbinding niet zo hoog te zijn als op de verbinding die onderzocht wordt. Om toch te kunnen bepalen hoeveel voertuigen op deze link geplaatst worden is gebruik gemaakt van een verschijnsel uit de praktijk. In een spitsperiode is vaak te zien dat één richting (van een wegvak) veel minder verkeer te verwerken heeft dan de andere richting. Dit principe is ook toegepast voor het netwerk in deze simulatie. De intensiteit in westelijke richting is vastgesteld op ongeveer de helft van die in oostelijke richting, namelijk 500 vtg/h, zie ook tabel 3.1.

	<i>Periode loopt van / tot</i>	<i>Aanbod verkeer zone 1</i>	<i>Aanbod verkeer zone 2</i>	<i>Snelheid (Link 9 & 10)</i>
Periode 1	0:00 – 0:25u	1100 vtg/h	500 vtg/h	80 km / h
Periode 2	0:25 – 0:35u	1100 vtg/h	500 vtg/h	15 km / h
Periode 3	0:35 – 0:45u	1100 vtg/h	500 vtg/h	80 km / h
Periode 4	0:45 – 1:00u	0 vtg/h	0 vtg/h	80 km / h

Tabel 3.1: Overzicht verkeersaanbod in de verschillende perioden van de simulatie

Het verkeersaanbod is opgebouwd uit een tweetal soorten voertuigen, te weten normale personenauto's en vrachtwagens. De verdeling tussen beide soorten voertuigen is 90% personenauto's en 10% vrachtwagens. De onderverdeling tussen de beide soorten voertuigen is gebaseerd op de Nederlandse situatie op het hoofdwegennet in de avondspits in 2003 (RWS-AVV, 2005).

In tabel 3.2 is een overzicht gegeven van de opbouw van het netwerk. In deze tabel zijn de verschillende afstanden van de links weergegeven met het bijbehorende linknummer.

<i>Link nr</i>	<i>Van node</i>	<i>Naar node</i>	<i>Lengte link (m) en rijrichting</i>	<i>Link nr</i>	<i>Van node</i>	<i>Naar node</i>	<i>Lengte link (m) en rijrichting</i>
1	1	2	100 (oost)	10	6	5	1000 (west)
2	2	1	100 (west)	11	6	7	25 (oost)
3	2	3	3950 (oost)	12	7	6	25 (west)
4	3	2	3950 (west)	13	7	8	25 (oost)
5	3	4	25 (oost)	14	8	7	25 (west)
6	4	3	25 (west)	15	8	9	3950 (oost)
7	4	5	25 (oost) Node 5 start Hazard	16	9	8	3950 (west)
8	5	4	25 (west)	17	9	10	100 (oost)
9	5	6	1000 (oost)	18	10	9	100 (west)
				Totale lengte netwerk			
				Oostelijke richting			9200 m
				Westelijke richting			9200 m

Tabel 3.2: Overzicht opbouw netwerk en de lengte van de afzonderlijke links in meters

3.2 Systeem

In deze paragraaf komt een tweetal systemen aan de orde. Als eerste komt het simulatiemodel aan bod waarmee onderzoek wordt gedaan naar de effecten van WILLWARN. Als tweede komt aan bod hoe WILLWARN werkzaam is in het simulatiemodel.

3.2.1 Simulatiemodel

Om WILLWARN te kunnen modelleren worden bepaalde eisen gesteld aan het simulatieprogramma waarmee dit gebeurt. Niet ieder simulatiemodel is geschikt voor toepassing in dit onderzoek. De keuze hierbij is gevallen op een zogenaamd microsimulatie model. Deze modellen bieden de mogelijkheid om het gedrag van de afzonderlijke voertuigen te beschrijven. Dit is echter nog niet voldoende: ook de specifieke eigenschappen van het ADA-systeem moeten geïntegreerd kunnen worden in de simulatie. Het simulatieprogramma moet de mogelijkheid bieden om het coöperatieve karakter van het ADA-systeem te integreren. Voorafgaand aan dit onderzoek is een analyse uitgevoerd tussen de verschillende beschikbare modellen om te bepalen of de modellen deze mogelijkheid hebben. Uiteindelijk bleek dat geen van de beschikbare modellen in eerste instantie geschikt is voor het simuleren van coöperatieve ADA-systemen. Ook de output die de verschillende modellen kunnen produceren was in het merendeel van de modellen niet geschikt voor het uitvoeren van dit onderzoek. Het was dus noodzakelijk om hiervoor een oplossing te zoeken. De oplossing voor dit probleem werd geboden door TNO. Zij hebben een plugin ontwikkeld voor Paramics waarin het wel mogelijk is om coöperatieve ADA-systemen te modelleren. Het is als het ware een programma dat ITS oplossingen kan inladen in een normaal simulatieprogramma. De ITS-modeller neemt de “besturing” van voertuigen over. Waarbij met behulp van het programma nieuwe technieken geïntegreerd kunnen worden in een normaal microsimulatieprogramma. Ook zijn in de ITS-modeller modules opgenomen die uitvoer genereren zoals informatie over verkeersveiligheid of uitstoot van voertuigen (Versteegt et al, 2005, Klunder et al, 2006). Deze combinatie maakt de ITS-modeller het meest geschikte micro-simulatiemodel voor dit onderzoek.

3.2.2 WILLWARN in simulatie

Tussen een daadwerkelijke invoering van een ADA-systeem in de praktijk en toepassing ervan in een simulatieprogramma bestaan uiteraard verschillen. Het is niet mogelijk om de praktijk voor de volle 100% te beschrijven. In dit geval is echter toch geprobeerd om een zo nauwkeurig mogelijke beschrijving te maken van de praktijk. In de komende alinea's worden de verschillende onderdelen van het systeem die relevant zijn voor de simulatie nader toegelicht.

- Forwarding zone

De hazard die geïntroduceerd wordt op het netwerk is voor alle voertuigen op het netwerk relevant. Ieder voertuig moet de hazard passeren tijdens de rit van zone A naar zone B. In de praktijk is dit natuurlijk niet altijd het geval. Om ongewenste waarschuwingen te voorkomen wordt in de praktijk gebruikt gemaakt van zowel ruimtelijke relevantie als relevantie op basis van tijd. Relevantie op basis van ruimte wordt getoetst met behulp van de zogenaamde forwarding area. Deze Forwarding area is het gebied waarbinnen een waarschuwing opgeslagen wordt in het WILLWARN systeem, relevant is voor bestuurders en verzonden wordt. Dit wordt in de praktijk ook nog gecombineerd met een zogenaamde trace (een overzicht van de afgelegde weg van het verzendende voertuig). Op basis van deze trace wordt getoetst of een waarschuwing relevant is voor een specifiek voertuig. Hierdoor zullen alleen die voertuigen die een gelijke weg afleggen een waarschuwing kunnen ontvangen. Echter om alleen voertuigen te waarschuwen die zich dichtbij de hazard bevinden te bereiken met een waarschuwing en niet iemand een waarschuwing ontvangt voor een situatie 20 km verderop in het netwerk is het noodzakelijk dat er een grens wordt aangegeven, de forwarding area.

De afmeting van de forwarding area is gebaseerd op de gemiddelde snelheid die voertuigen op het wegvak met een hazard rijden en een vastgestelde maximale tijd dat de waarschuwing bij de bestuurders kan aan komen. Er wordt dus een maximale afstand ingesteld die ingegeven is door de snelheid van het desbetreffende wegvak en door een maximale tijd. Hiervoor is gekozen om bestuurders onafhankelijk van hun snelheid toch tijdig (maar ook niet te vroeg) te kunnen waarschuwen. Voertuigen krijgen maximaal anderhalve minuut voor de hazard een waarschuwing. Dit zorgt ervoor dat een waarschuwing niet verloren gaat door een verlies van attentie van de bestuurders. Voor het berekenen van de lengte (afstand tussen hazard en einde forwarding area) van de forwarding area is gebruik gemaakt van de onderstaande formule:

Formule: $Forwarding\ Area(m) = \frac{speed}{3,6} \cdot time$

Speed = gemiddelde snelheid op het desbetreffende wegvak (km/h)

Time = Maximale tijd voorafgaand aan de hazard (1,5 min = 90s)

Als deze formule wordt toegepast voor het netwerk in het simulatieonderzoek dan blijkt dat de forwarding area een lengte heeft van:

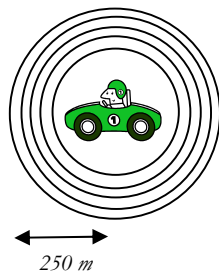
$$Forwarding\ Area(m) = \frac{speed}{3,6} \cdot time \Rightarrow \frac{80(km/h)}{3,6} \cdot 90 = 2000m$$

De lengte van de forwarding area in de simulatieomgeving bedraagt 2000m. De breedte van de forwarding area is in de simulatieomgeving niet van belang aangezien het hier een recht wegvak betreft. In de praktijk is dit uiteraard wel van belang aangezien de weg voorafgaand aan de hazard een bochtig verloop kan hebben en voertuigen mogelijk buiten de forwarding area komen. In de simulatie is de breedte van de forwarding zone niet relevant. Omdat in de praktijk een rechthoekige forwarding zone voordelen heeft voor wat betreft het toetsen van de relevantie van waarschuwingen is besloten

om ook in de simulatie een rechthoekige forwarding area te gebruiken. De breedte van de forwarding zone is in de simulatie vastgesteld op één kilometer. Voor de resultaten en de werking van WILLWARN in de simulatie is deze breedte niet relevant.

- **Verzend Range**

Om het ADA-systeem te kunnen laten functioneren wordt gebruikt gemaakt van zogenaamd Wireless Internet. Ieder voertuig uitgerust met het systeem beschikt over zowel een ontvanger als zender voor deze vorm van communicatie. Indien een voertuig een gevaarlijke situatie detecteert en herkent kan deze een waarschuwing uit gaan zenden. De verschillende voertuigen vormen dan een netwerk genaamd Vanet, Vehicular Ad Hoc Network (Schaefer & Karduck, 2005). In internet netwerken wordt vaak gebruik gemaakt van zogenaamde peer tot peer netwerken die geen vaste hiërarchie kennen en geen centrale infrastructuur. Zo vormen zich spontane netwerken, Ad – Hoc



Figuur 3.2: Maximale zendafstand individuele voertuig

netwerken. Indien dit gecombineerd wordt met voertuigen die uitgerust zijn met een zender en ontvanger vormen zij de infrastructuur van het netwerk. Alleen is in dit geval ook nog de “infrastructuur” van het netwerk mobiel (Schaefer & Karduck, 2005). De voertuigen worden zo tot contextprovider en het uitwisselen van informatie kan zo op real time basis plaatsvinden (Straßberger & Adler, 2005). Deze netwerken zijn echter ook aan beperkingen onderhevig. Zo is het niet mogelijk een waarschuwing over onbeperkte afstand te verzenden. De beperking zit in de maximale afstand die een individuele zender kan overbruggen. In de simulatie zal gewerkt worden met een maximale afstand die een individuele zender kan overbruggen van 250m (Wu et al, 2004). Ieder voertuig dat uitgerust is met het ADA-systeem zendt uit in een gebied van 250m. om het voertuig heen (zie ook figuur 3.2).

3.3 Veranderingen bestuurdersgedrag

Het idee achter invoering van het waarschuwingssysteem is dat het blikveld van bestuurders door een vroegtijdige waarschuwing vergroot wordt. Doordat bestuurders vroegtijdig op de hoogte zijn van een gevaarlijke situatie stoomafwaarts kunnen zij ook anticiperen op deze omstandigheden. Dit kan leiden tot veranderend gedrag bij de bestuurders. Het vroegtijdig waarschuwen van bestuurders voor gevaarlijke situaties leidt tot verhoging van de alertheid van de bestuurder, het zogenaamde activation level (Tampere, 2004).

Veranderingen in dit activation level kunnen leiden tot veranderingen in het gedrag van de bestuurder op de onderstaande punten:

- Reactie tijd
- Anticipatie afstand
- Anticipatie sterkte
- Rijstrook wisselingen
- Gewenste volgafstanden
- Gewenste snelheden
- Mate van ingrijpen van de bestuurder

Het vroegtijdig waarschuwen van de bestuurder kan dus leiden tot een groot aantal verschillende reacties. In de simulatie wordt dit vereenvoudigd door op drie punten het gedrag van de voertuigen (bestuurders) aan te passen nadat zij een waarschuwing hebben ontvangen. Enkele van de reacties die door Tampere worden beschreven zijn in de simulatieomgeving niet te modelleren. Uiteindelijk heeft dit geleid tot de keuze voor een drietal aanpassingen van het gedrag. Indien een bestuurder een waarschuwing ontvangt dat er verder in het netwerk sprake is van een gevaarlijke situatie zal hij als eerste geneigd zijn om zijn volgafstand te vergroten. Indien voertuigen de gevaarlijke situatie dichterbij naderen zal er ook bereidheid zijn om de snelheid te verlagen. Ook zullen bestuurders door de waarschuwing alerter zijn, wat inhoudt dat zij een kleinere reactietijd hebben dan niet gewaarschuwde bestuurders. Gewaarschuwde voertuigen zullen op basis van een drietal veranderingen hun gedrag aanpassen.

- Gedragsaanpassing algemeen: Aanpassing reactietijd
Doordat de bestuurders van voertuigen uitgerust met WILLWARN, tijdig een waarschuwing krijgen voor gevaarlijke omstandigheden op de weg, mag verondersteld worden dat zij alerter zijn. Op basis hiervan mag verwacht worden dat gewaarschuwde bestuurders een kleinere reactietijd hebben dan bestuurders die niet gewaarschuwd zijn. Indien de bestuurders gewaarschuwd worden zal hun reactietijd afnemen met 0,1s van 0,3s tot 0,2s. Dit is de pure reactietijd van de bestuurder. De tijd die nodig is om daadwerkelijk een beslissing te nemen neemt meer tijd in beslag. De gewaarschuwde bestuurders zullen dus 0,1s eerder in staat zijn om hun beslissing uit te voeren dan bestuurders die niet gewaarschuwd zijn. Deze reactie zal optreden vanaf het moment dat de bestuurder de waarschuwing ontvangt en aanhouden tot de bestuurder de hazard is gepasseerd. Nadat de hazard gepasseerd is, zullen de bestuurders weer hun normale gedrag hervatten en is hun reactietijd gelijk aan de bestuurders zonder het ADA-systeem. Een aanpassing van alleen de reactietijd heeft marginale effecten op de verkeersveiligheid
- Gedragsaanpassing 1: Aanpassing (wens)snelheid
De tweede aanpassing van het gedrag die zal plaatsvinden is een aanpassing van de (wens)snelheid van de gewaarschuwde voertuigen. Indien de bestuurders gewaarschuwd worden voor een gevaarlijke situatie dan blijkt volgens Tampere dat door een verhoogd attention level mensen hun gewenste snelheid zullen aanpassen. In dit geval zal er sprake zijn van een verlaagde (wens)snelheid. In tegenstelling tot de eerste stap zal de (wens)snelheid plaatsgebonden worden aangepast. Indien de bestuurder een waarschuwing ontvangt zal zijn wenssnelheid afnemen tot 50 km/h. De bestuurders zullen dit echter niet meteen na het ontvangen van de waarschuwing doen. De aanpassing van de (wens)snelheid zal pas plaatsvinden indien de voertuigen zich op een bepaalde afstand van de hazard bevinden. Deze werkwijze is toegepast omdat het niet realistisch zou zijn om voertuigen twee kilometer voorafgaand aan de hazard al te laten afremmen naar 50 km/h. Zodoende rijden gewaarschuwde bestuurders door tot 250m van de hazard om daar hun snelheid vroegtijdig aan te passen. Hierdoor hoeven gewaarschuwde voertuigen niet op het allerlaatste moment sterk te vertragen.
- Gedragsaanpassing 2: Aanpassing (wens)volgafstand
Als derde en laatste aanpassing van het gedrag zal de (wens)volgafstand worden aangepast. Als voertuigen uitgerust met het ADA-systeem een waarschuwing ontvangen voor gevaarlijke situaties op het netwerk dan is het aannemelijk dat zij hun (wens)volgafstand aanpassen zoals ook door Tampere wordt beschreven. Door hun volgafstand aan te passen creëren de bestuurders van gewaarschuwde voertuigen voor zichzelf meer tijd en ruimte om te reageren op de verderop gelegen hazard. De bestuurders van gewaarschuwde voertuigen zullen niet meteen op het moment van waarschuwen hun volgafstand aanpassen. Echter net

als bij de aanpassing van de (wens)snelheid zal de aanpassing van de (wens)volgafstand op een vastgestelde afstand voor de hazard plaatsvinden. De (wens)snelheid wordt echter vrij dicht voor de hazard aangepast terwijl het vergroten van de (wens)volgafstand op grotere afstand voor de hazard zal worden aangepast. Een normale bestuurder in de simulatie volgt zijn voorganger aan de hand van het car – following model dat in de simulatie gebruikt wordt. Deze gewenste volgafstand is gebaseerd op de snelheid van de voertuigen op ieder specifiek moment en wordt berekend aan de hand van de onderstaande formule (Van Arem et al, 1997):

$$d_{ref} = c_1 + c_2 \cdot v + c_3 \cdot v^2$$

Waarin:

d_{ref}	=	Gewenste volgafstand (m)
$c_1 \ c_2 \ c_3$	=	Constanten die volgedrag beschrijven (3 - 0,25 – 0,02)
v	=	Snelheid (m/s)

Tijdens de simulatie zullen de voertuigen die een waarschuwing ontvangen hebben, hun volgafstand vergroten volgens een vooraf aangegeven factor. Deze factor bedraagt: 1,2, wat inhoudt dat de (wens)volgafstand met 20% toeneemt. De keuze voor deze waarde is gebaseerd op basis van enkele proefruns met verschillende waarden. Een zeer grote verandering in de (wens)volgafstand zal in de praktijk nooit realiseerbaar zijn. Een waarde kleiner als 1,2 heeft op basis van de proefruns marginale effecten. In wezen veranderd de formule voor het volgen van voertuigen voor gewaarschuwde voertuigen als volgt:

$$d_{ref} = 1,2(c_1 + c_2 \cdot v + c_3 \cdot v^2)$$

Waarin:

1,2	=	Factor die vergroting (wens)volgafstand beschrijft
d_{ref}	=	Gewenste volgafstand (m)
$c_1 \ c_2 \ c_3$	=	Constanten die volgedrag beschrijven (3 - 0,25 – 0,02)
v	=	Snelheid (m/s)

Als voorbeeld wordt hier uitgegaan van een gemiddelde snelheid voorafgaand aan de hazard van ± 80 km/h. Indien een voertuig een waarschuwing ontvangt, zal deze zijn (wens)volgafstand aanpassen, volgens onderstaand voorbeeld:

“Normaal” voertuig:

$$d_{ref} = c_1 + c_2 \cdot v + c_3 \cdot v^2 = 3 + 0,25 \cdot 22,22 + 0,02 \cdot (22,22)^2 = 18,43 \text{ m}$$

Gewaarschuwd voertuig:

$$d_{ref} = 1,2(c_1 + c_2 \cdot v + c_3 \cdot v^2) = 1,2(3 + 0,25 \cdot 22,22 + 0,02 \cdot (22,22)^2) = 22,12 \text{ m}$$

Bestuurders die gewaarschuwd worden, zullen op 1000m voorafgaand aan de hazard hun volgafstand aanpassen aan de veranderende omstandigheden.

Na het uitvoeren van proefruns met de verschillende gedragsaanpassingen bleek dat een aanpassing van alleen de reactietijd zeer marginale effecten had. Uiteindelijk is besloten om deze gedragsverandering niet afzonderlijk op te nemen in het onderzoek. In de verschillende scenario's is de reactietijd aangepast steeds in combinatie met een van de andere gedragsaanpassingen. Hierbij mag worden aangenomen dat de effecten van WILLWARN voornamelijk te wijten zijn aan aanpassing van de (wens)snelheid of aan de (wens)volgafstand. Eventuele interactie effecten tussen de reactietijd en de andere gedragsaanpassingen zijn bewust niet onderzocht. Ook in de praktijk zal een gewaarschuwde bestuurder alerter (kleinere reactietijd) zijn dan een niet gewaarschuwde bestuurder ongeacht zijn overige gedragsaanpassingen.

3.4 Onderzoeksmethodiek

Om te kunnen beantwoorden of WILLWARN daadwerkelijk bijdraagt aan de verkeersveiligheid zijn de verschillende gedragsveranderingen van bestuurders onderzocht door het uitvoeren van verschillende scenario's. Hiervoor is een plan de campagne opgezet waarmee systematisch de verschillende scenario's onderzocht zullen worden. Deze scenario's zijn ontstaan te variëren met de penetratiegraad van het systeem en de gedragsveranderingen uit paragraaf 3.3. De gedragsverandering bestaan dus uit een aanpassing van de (wens)volgafstand (gecombineerd met aanpassing van de reactietijd) en uit een aanpassing van de (wens)snelheid (gecombineerd met aanpassing van de reactietijd). De penetratiegraad is de mate waarin een goed of dienst is doorgedrongen in een bepaalde markt. In dit geval is de penetratiegraad het percentage voertuigen dat is uitgerust met WILLWARN. In tabel 3.3 is te zien welke penetratiegraden er in dit onderzoek zijn toegepast.

<i>Situatie</i>	<i>Penetratiegraad WILLWARN voertuigen</i>
<i>Stap 0</i>	0 %
<i>Stap 1</i>	5 %
<i>Stap 2</i>	20 %
<i>Stap 3</i>	50 %

Tabel 3.3: Penetratiegraden welke toegepast zullen worden in het simulatieonderzoek

De keuze voor deze penetratiegraden is gebaseerd op een geleidelijke marktintroductie van het ADA-systeem. Een grootschalige introductie van een coöperatieve ADA-systeem kan niet van de een op de andere dag gerealiseerd worden, vandaar de keuze voor deze oplopende penetratiegraden. Een situatie met meer communicerende voertuigen zal waarschijnlijk een heel ander beeld geven dan een met maar enkele voertuigen die communiceren. Om deze eventuele effecten te kunnen zien is gekozen voor de bovenstaande penetratiegraden. Een hogere penetratiegraad dan 50% zal niet worden onderzocht. Bij een groot aantal voertuigen uitgerust met het systeem zijn de overige weggebruikers genooddaakt hun gedrag aan te passen aan het gedrag van gewaarschuwde voertuigen. Aangezien bij een penetratiegraad van 50% al sprake is van een sterke invloed op de overige hoeveelheid verkeer (overig verkeer dient zich bij deze penetratiegraad al sterk aan te passen aan de gewaarschuwde voertuigen) is besloten om penetratiegraden boven de 50% niet te onderzoeken. Er is aangenomen dat er een penetratiegraad boven de 50% niet leidt tot extra positieve effecten op de verkeersveiligheid.

Zoals al is aangegeven zullen er een tweetal veranderingen in het gedrag van de bestuurders worden onderzocht. Deze twee veranderingen in het gedrag zijn: een vergroting van de (wens)volgafstand of een verlaging van de wenssnelheid. Bij deze twee veranderde gedragingen wordt tevens de reactietijd van de bestuurder aangepast. In tabel 3.4 is een overzicht weergegeven van de verschillende scenario's die onderzocht zullen worden. Omdat combinaties van beide gedragsveranderingen niet zijn meegenomen in dit onderzoek kunnen er met de bovenstaande gedragsveranderingen en penetratiegraden een zevental verschillende scenario's gemaakt worden. Mogelijke interactie effecten

tussen de gedragsveranderingen zijn niet onderzocht. In een eventueel vervolgonderzoek is het mogelijk om ook combinaties tussen verschillende gedragsveranderingen te onderzoeken.

Nr.	Penetratiegraad	Aanpassing gedrag	
		Aanpassing (wens) snelheid	Aanpassing (wens)volgafstand
<i>referentiesituatie</i>	0 %	-	-
<i>Scenario 1</i>	5 %	50 km/h, 250m voor hazard	-
<i>Scenario 2</i>	5 %	-	20% groter, 1000m voor hazard
<i>Scenario 3</i>	20 %	50 km/h, 250m voor hazard	-
<i>Scenario 4</i>	20 %	-	20% groter, 1000m voor hazard
<i>Scenario 5</i>	50 %	50 km/h, 250m voor hazard	-
<i>Scenario 6</i>	50 %	-	20% groter, 1000m voor hazard

Tabel 3.4: Overzicht van de verschillende scenario's en de bijbehorende gedragsaanpassingen

Het eerste scenario is in dit geval de referentiesituatie. De scenario's met WILLWARN zullen vergeleken worden met dit scenario. Om de huidige verkeerssituatie te simuleren zullen er *geen* voertuigen worden uitgerust met WILLWARN. Bestuurders worden niet vroegtijdig op de hoogte gebracht van de hazard. Alle andere parameters zullen in de loop van het onderzoek gelijk worden gehouden, met uitzondering van de penetratiegraad en de gedragsverandering.

Voor ieder scenario's geldt dat er meerdere simulatieruns uitgevoerd moeten worden. Het verkeer dat op het netwerk wordt geplaatst wordt aan de hand door een zogenaamde seed waarde verdeeld. De zogenaamde seed is een vooraf ingestelde configuratie waarin de verdeling van de voertuigen over de tijd is vastgelegd. Voor het gedrag en de tijd waarop een voertuig op het netwerk wordt geplaatst zijn verdelingen in het simulatieprogramma opgenomen. Gekoppeld aan de seed waarde wordt uit deze verdelingen random een configuratie getrokken. Dit leidt tot vooraf ingesteld gedrag van voertuigen, zoals beginsnelheden en volgafstanden. Ook wordt vooraf vastgesteld wanneer de voertuigen op het netwerk worden geplaatst. Nadat een voertuig op het netwerk is geplaatst (beginsituatie) zal het voertuig, volgens het voertuig volgmodel (zie ook Van Arem, 1997), iedere tijdstap zijn volgafstand en snelheid aanpassen ten opzichte van zijn voorganger.

Door de hierboven genoemde werking van de seed, is het noodzakelijk dat er meerdere runs worden uitgevoerd met verschillende seed waarden. Een enkele run met een bepaalde seed waarde kan leiden tot eventuele toevalligheden en dus verstoring van de resultaten. Om deze eventuele toevalligheden te voorkomen worden voor ieder scenario een groot aantal runs uitgevoerd met verschillende seeds. In het onderzoek zullen voor ieder scenario een veertigtal runs uitgevoerd worden, die uiteindelijk gemiddeld zullen worden. Een verdere uitbreiding van het aantal runs met verschillende seeds leidt uiteindelijk tot een nog kleinere spreiding in de resultaten. Echter bleek bij een veertigtal runs de spreiding zodanig af te nemen dat het niet noodzakelijk was om nog meer runs per scenario uit te voeren.

3.5 Indicatoren verkeersveiligheid

Het onderzoek is gericht op de verkeersveiligheid van het WILLWARN. Om een beeld te krijgen van de effecten op de verkeersveiligheid is het noodzakelijk dat in een simulatieomgeving gebruik wordt gemaakt van zogenaamde veiligheidsindicatoren. In deze paragraaf komen de voor dit onderzoek gebruikte indicatoren aan de orde.

In de verkeerskunde wordt vaak het aantal slachtoffers en/of het aantal gewonden gebruikt om aan te geven of een gebied verkeersveilig is of niet. Deze indicatoren zijn echter voor gebruik in een microsimulatie onderzoek niet toepasbaar. Simulatieprogramma's zijn niet geschikt om ongevallen zodanig te modelleren dat er duidelijkheid ontstaat over de gevolgen (doden / gewonden). Het is noodzakelijk dat andere indicatoren gezocht worden die wel toepasbaar zijn en die een beeld geven van de verkeersveiligheid, de zogenaamde surrogaat veiligheidsindicatoren.

Het ADA-systeem dat onderzocht wordt is in het bijzonder gericht op het verminderen van snelheidsverschillen tussen voertuigen. Deze snelheidsverschillen liggen vaak ten grondslag aan ongevallen of kunnen bepalend zijn voor de afloop van een ongeval. Een hogere snelheid maakt dat er minder tijd is voor de bestuurder om een mogelijk gevaarlijke situatie te voorkomen. De afloop van een ongeval kan sterk bepaald worden door de snelheid. Een hogere snelheid in combinatie met de massa van een voertuig zorgt voor een hogere kinetische energie die tijdens een ongeval verwerkt moet worden (Archer, 2004). Omdat deze snelheidsverschillen een grote invloed kunnen hebben op de verkeersveiligheid is het noodzakelijk dat deze met behulp van het simulatiemodel gemeten kunnen worden. Deze snelheidsverschillen kunnen ook omschreven worden als de variatie in de snelheid op een bepaalde plek (of over een link). De variatie in de snelheid is een indicatie voor eventuele gevaarlijke situaties waaruit een ongeval kan ontstaan. Een kleinere variatie in snelheid kan een indicatie zijn voor een vergroting van de verkeersveiligheid. Tevens is een verkleining van de variatie reden om aan te nemen dat mochten er eventuele ongevallen gebeuren dat dan de gevolgen minder ernstig zullen zijn (Archer, 2004). De hierboven genoemde snelheidsverschillen worden in dit onderzoek gebruikt als een indicator voor de verkeersveiligheid. In het verdere verloop van dit rapport zullen deze snelheidsverschillen worden aangeduid als de standaarddeviatie van de snelheid.

In dit onderzoek ligt de nadruk in het bijzonder op ongevallen die ontstaan door snelheidsverschillen tussen voertuigen. Om deze ongevallen te kunnen beoordelen is een combinatie van de snelheid en de volgfstand (headway) een belangrijke parameter. Een indicator die deze combinatie weer kan geven is de zogenaamde Time to Collision (TTC). In het verleden is de TTC reeds veelvuldig toegepast als indicator voor het onderzoeken van verkeersveiligheid in simulatieonderzoeken zie bijvoorbeeld: Minderhoud & Bovy, 2001 en Louwerse 2005. De TTC wordt beschouwd als een indicator die goed toepasbaar is binnen simulatieonderzoeken omdat het met deze indicator mogelijk is om verschillende tijdstippen en situaties (wel / niet uitgerust met ADA-systemen) te onderzoeken (Vogel, 2002). Deze indicator is als eerste onder de aandacht gebracht door Hayward (1972) die de TTC als volgt omschreef:

"The time that remains until a collision between two vehicles would have occurred if the collision course and the speed difference are maintained."

Met behulp van deze indicator wordt een indirect beeld verkregen van de verkeersveiligheid. Met behulp van deze indicator is het mogelijk om een beeld te krijgen van het aantal ongevallen, de ernst van het ongeval kan met behulp van deze indicator niet bepaald worden (Getmann & Head, 2003).

De formule voor het berekenen van de TTC kan als volgt worden omschreven (Minderhoud & Bovy, 2001):

$$TTC_i = \frac{X_{i-1}(t) - X_i(t) - l_i}{V_i(t) - V_{i-1}(t)} \quad \forall V_i(t) > V_{i-1}(t)$$

Waarin:

X_i	= Positie van voertuig i	(m.)
V_i	= Snelheid van voertuig i	(m./s.)
l_i	= Lengte van voertuig i	(m.)

Met behulp van de bovenstaande formule is mogelijk om zowel een TTC te berekenen voor situaties waarin voertuigen een en dezelfde richting uit rijden (kop-staart botsingen) als voor het berekenen van TTC waarbij sprake is van kruisend verkeer. De TTC als indicator in dit onderzoek biedt dan ook een goede basis voor het beoordelen van veranderingen in de verkeersveiligheid. In combinatie met de werking van het ADA-systeem biedt TTC een goed beeld van de veranderingen in de verkeersveiligheid. Het probleem met de TTC als indicator is dat er een kritieke waarde bepaald moet worden waarbinnen de TTC als gevaarlijk wordt beschouwd. Het mag verondersteld worden dat een kleinere TTC waarde een indicatie kan zijn voor kritieke situaties. Dit in tegenstelling tot grotere TTC waarden die een veel kleinere invloed hebben op de verkeersveiligheid (Minderhoud & Bovy, 2001). Uit eerder uitgevoerde onderzoeken blijkt dat bij een TTC van 3,0 sec. gesproken kan worden van een oncomfortabele situatie voor de bestuurder en dat bij een TTC van 1,5 sec. gesproken kan worden van een gevaarlijke situatie waarbij een ongeval vaak niet meer af te wenden is (Minderhoud & Hoogendoorn, 2001). Dit maakt dat de TTC een geschikte indicator is voor het beoogde doel van dit onderzoek. Doordat de in dit onderzoek gebruikte software de TTC niet in halve seconden als uitvoer kon geven is besloten om te werken met een TTC kleiner dan 1,0s en een TTC kleiner dan 2,0s. Beide waarden zijn gekozen om weer te geven of de situatie met ADA-systeem daadwerkelijk veiliger is geworden. Een $TTC < 2,0s$ wordt ook meegenomen omdat hierin sprake is van een overlap met de al eerder genoemde gevaarlijke situaties kleiner dan 1,5s.

Als derde en laatste indicator voor de verkeersveiligheid wordt in dit onderzoek de verdeling van de remvertraging gebruikt, in het bijzonder het percentage remvertragingen kleiner dan $-4,5m/s^2$. Deze vertraging is zodanig sterk dat er sprake is van een remvertraging die een noodstop in de praktijk benadert. De maximale remvertraging die een voertuig onder ideale omstandigheden kan bereiken is hoger dan de hier genoemde $-4,5 m/s^2$. De indicator geeft in dit geval dus een bovengrens aan. Alle remvertragingen kleiner dan $-4,5 m/s^2$ worden meegenomen. Hiermee zijn automatisch ook de zeer zware remacties, die optreden tijdens een noodstop, opgenomen in de indicator.

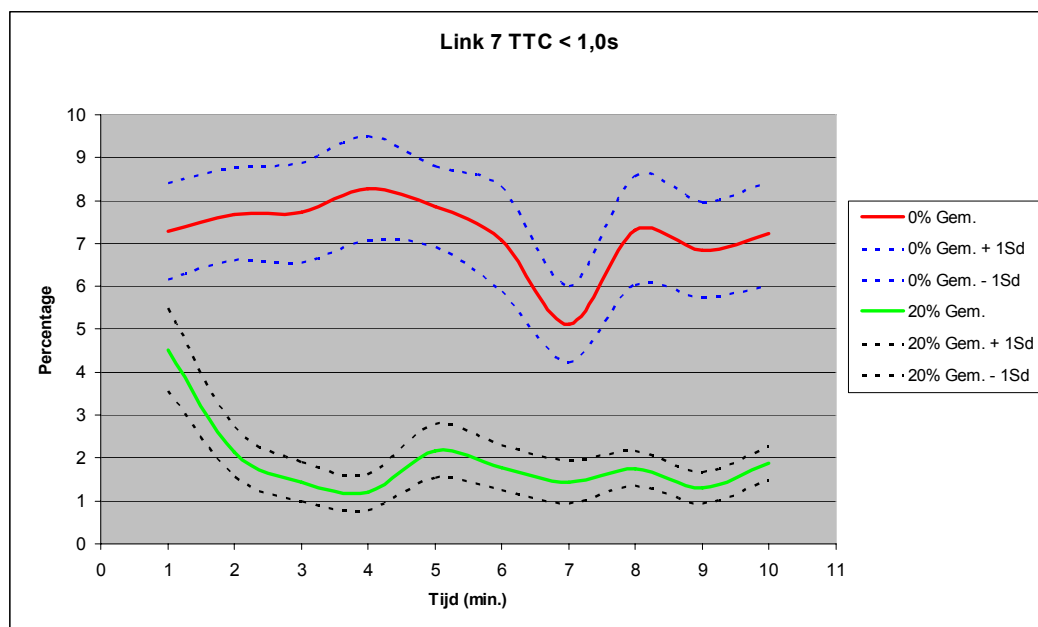
4 Resultaten simulatie

In dit hoofdstuk komen de resultaten van de simulatie aan bod. In paragraaf 4.1 wordt eerst uitleg gegeven hoe de resultaten zijn bewerkt en geanalyseerd. Vervolgens worden in de paragrafen 4.2 en 4.3 de resultaten per link nader toegelicht.

4.1 Algemeen

Voorafgaand aan de uiteindelijke analyse op basis van de genoemde indicatoren in paragraaf 3.5, dient nader toegelicht te worden hoe de verschillende scenario's met elkaar vergeleken zijn. De resultaten die de simulatie heeft opgeleverd zijn zodanig bewerkt dat het mogelijk is de verschillende scenario's onderling te vergelijken. In deze paragraaf zal stapsgewijs worden toegelicht welke handelingen zijn uitgevoerd om de resultaten onderling te kunnen vergelijken.

- Voor ieder scenario zijn een veertigtal runs uitgevoerd. Deze veertig runs zijn allen uitgevoerd met een verschillende seed waarde. De werking van deze seed waarde is nader toegelicht in paragraaf 3.4. De output per minuut (op basis van deze drie indicatoren), die deze veertig runs hebben opgeleverd, zijn gemiddeld zodat er een gemiddelde per minuut is verkregen. Ook is voor iedere afzonderlijke minuut de bijbehorende standaarddeviatie geschat. Met behulp van deze standaarddeviatie per minuut is het mogelijk om de spreiding in de gemiddelde waarde van de afzonderlijke minuten te bepalen. Hiervoor is de standaarddeviatie gedeeld door de wortel van het aantal seeds (in dit geval $\sqrt{40}$). De gedachte hierachter is dat door een vergroting van het aantal seeds een steeds kleinere spreiding zal optreden in het gemiddelde per minuut. Als voorbeeld voor de resultaten die nu verkregen zijn is in grafiek 4.1 een overzicht gegeven van de referentiesituatie en het scenario met 20% uitgeruste voertuigen waarbij de snelheid is aangepast. In deze grafiek is het gemiddelde percentage TTC kleiner dan 1,0s (per minuut) uitgezet tegen de tijd. Zichtbaar is het gemiddelde TTC < 1,0s per minuut plus/minus éénmaal de standaarddeviatie. Hierdoor ontstaat er een beeld van de spreiding in de afzonderlijke minuten.



Grafiek 4.1: Referentiesituatie en scenario, 20% penetratiegraad en snelheid aangepast, uitgezet tegen de tijd met de bijbehorende standaardafwijkingen per minuut.

- Uit grafiek 4.1 blijkt dat er een duidelijk verschil is, voor de niet-referentie situatie, tussen de eerste minuut en de overige negen minuten waarbij de hazard aanwezig is. Tijdens de simulatie in minuut 26 (2^{de} minuut hazard aanwezig, in grafiek minuut 2) is sprake van een sterke daling van het percentage TTC kleiner dan 1,0s. Deze plotselinge daling in de 2^{de} minuut van de hazard is mogelijk het gevolg van de kenmerken van het systeem. Eerst zal de hazard gedetecteerd moeten worden, waarop pas een waarschuwing aan andere voertuigen verzonden kan worden. Het fysiek detecteren van de hazard kan enige tijd in beslag nemen waarin er nog steeds sprake is van een hoog percentage gevaarlijke situaties. Dit effect, het hoge percentage $TTC < 1,0s$ geldt niet alleen voor dit scenario maar met uitzondering van de referentiesituatie, treedt dit effect ook in de andere scenario's op. Ook de "dip" in de resultaten in de referentiesituatie, ter hoogte van minuut zeven valt op. In tegenstelling tot de sterke daling na de eerste minuut is het niet mogelijk hier een logische verklaring voor te geven. Mogelijk berust deze "dip" niet op een systematisch gegeven, maar is dit het gevolg van toeval. Om dit te kunnen toetsen is het mogelijk om een groter aantal runs uit te voeren. In dit onderzoek is dit niet nader onderzocht.

Het is aannemelijk dat de eerste minuut afwijkt van de overige negen minuten waarin de hazard aanwezig is. Uiteindelijk is besloten om de analyse op te splitsen in een tweetal onderdelen, de eerste minuut afzonderlijk en de laatste negen minuten. De laatste negen minuten lijken allen een min of meer gelijk percentage $TTC < 1,0s$ te hebben. Zo is in het 20% scenario het gemiddelde over de laatste negen minuten ongeveer 1,7% en in de referentiesituatie ongeveer 7,3%. Om te toetsen of de variatie ten opzichte van een constante waarde, in dit geval het gemiddelde, berust op toeval is er op de laatste negen minuten een χ^2 - toets uitgevoerd. Hieruit blijkt dat de variaties die optreden niet systematisch zijn. Voor de "dip" die optreedt in de zevende minuut is geen bewijs dat deze systematisch is. Het is aannemelijk dat deze "dip" het resultaat is van toevalligheden. Hierdoor is het mogelijk deze negen minuten te beschrijven door een gemiddelde waarde en een bijbehorende standaarddeviatie.

- Zoals al is aangegeven kunnen de laatste negen minuten door één waarde per indicator beschreven worden. Hiervoor is een gemiddelde over deze *laatste* negen minuten berekend. Bij dit gemiddelde hoort echter ook nog een spreiding. De spreiding kan op een tweetal manieren berekend worden, door over de negen minuten de spreiding te berekenen, of door de variantie van het gemiddelde te bepalen met behulp van de individuele variaties per minuut gebaseerd op 40 seeds. Voor de verschillende scenario's zijn beide methoden uitgevoerd, zie ook tabel 4.1 waarin dit voor de referentiesituatie gedaan is. In de derde en vierde kolom zijn het gemiddelde percentage $TTC < 1,0s$ en de bijbehorende standaarddeviatie per minuut uitgezet. In de laatste twee rijen van de tabel is de berekening van de SD via beide methoden weergegeven. Na het berekenen van de variaties volgens beide methoden blijkt dat beide een variantie opleveren die in dezelfde orde van grootte ligt. Indien deze waarden in dezelfde orde van grootte liggen mag aangenomen worden dat de minuten onderling niet gecorreleerd zijn.

Scenario	Minuut	Gemiddeld % $TTC < 1,0s$	Sd (σ) over minuut
0 %	2	7,684	1,078
	3	7,716	1,151
	4	8,287	1,209
	5	7,862	0,934
	6	7,085	1,223
	7	5,116	0,879
	8	7,298	1,254
	9	6,843	1,109
	10	7,227	1,213
	Gemiddelde	7,235	
	Sd van gemiddelde	0,908	1,124
	Sd / $\sqrt{9}$	0,302	0,375

Tabel 4.1: Voorbeeld referentiesituatie ter bepaling variantie laatste negen minuten van de hazard

Voor de analyse van de resultaten en uiteindelijk voor de conclusies in dit onderzoek is het van ondergeschikt belang welke berekeningsmethode wordt toegepast voor de spreiding. Uiteindelijk is besloten om gebruik te maken van de spreiding die berekend is op basis van de spreiding per afzonderlijke minuut. Voor de analyse van de resultaten wordt in de referentie situatie gebruikt gemaakt van 0,375 als standaarddeviatie voor de laatste negen minuten.

- Uiteindelijk blijft er voor ieder scenario een waarde over met de bijbehorende spreiding, die het gemiddelde beschrijft. Op basis van deze waarden zullen de scenario's onderling worden vergeleken. Volgens de formules uit basiskansrekening geldt dat:

$$E(X - Y) = EX - EY$$

$$\sigma^2(X - Y) = \sigma^2 X + \sigma^2 Y - 2 \text{cov}(X, Y) \leq \sigma^2 X + \sigma^2 Y$$

In deze formule staat X en Y synoniem voor een scenario, bijvoorbeeld X is de referentiesituatie en Y is scenario 2, met 5% penetratiegraad en een aanpassing van de snelheid. Om een significant verschil te kunnen aantonen dient er aan een aantal voorwaarden voldaan te worden. Als eerste dient het verschil tussen beide scenario's ($EX - EY$) ongelijk te zijn aan nul. Echter beide scenario's kennen ook een standaarddeviatie wat meegenomen dient te worden. Dit gebeurt middels de tweede formule. Tussen de verschillende scenario's is sprake van een positieve correlatie. Dit houdt in dat als er voor een seed een lagere score voor een indicator wordt waargenomen dat de kans groot is, dat bij een andere seed ook een lage score wordt waargenomen. Als er een hoge score wordt waargenomen dan is de kans groot dat er bij een ander scenario ook een hoge score wordt waargenomen. Door deze positieve correlatie is de som van variatie van het verschil in werkelijkheid kleiner dan de som van de variaties. Als we aannemen dat de scenario's X en Y beiden Gaussisch verdeeld zijn en de berekende waarde $2\sqrt{(\sigma X + \sigma Y)}$ als (boven) limiet aanhouden, dan kan met ongeveer 95% zekerheid aangenomen worden dat twee scenario's significant van elkaar verschillen als er wordt gerekend met tweemaal de standaarddeviatie. Dit is vergelijkbaar met een zogenaamde tweezijdige Student T-toets omdat de sample grootte in dit geval vrij groot is. In dit geval is de sample grootte 40 runs waardoor de hier gebruikte methode toepasbaar is.

- Als volgende en laatste stap zijn de verschillende scenario's onderling vergeleken op basis van de resultaten. Hierbij worden de scenario's met gelijke penetratiegraad maar met verschillende gedragsaanpassingen met elkaar vergeleken. Zo worden bijvoorbeeld het scenario van 5% penetratiegraad, aanpassing (wens)snelheid vergeleken met het scenario 5% penetratiegraad, aanpassing (wens)volgafstand met elkaar vergeleken. Hiermee is getracht om een eventueel significant verschil tussen de gedragsaanpassingen aan te tonen indien dit aanwezig is. Ook hiervoor wordt gebruik gemaakt van de formule genoemd in bovenstaande stap.

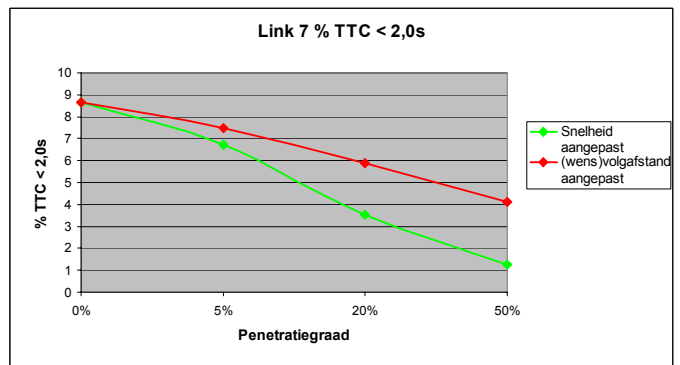
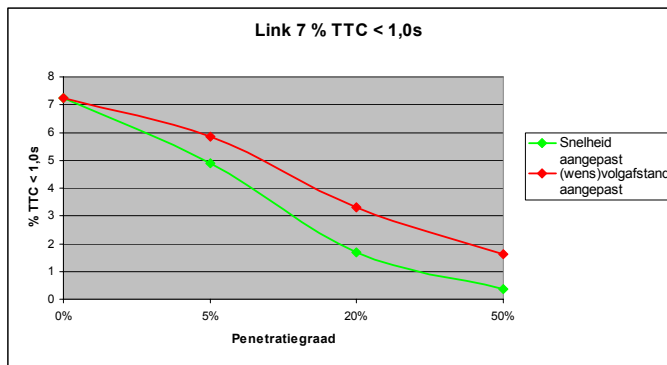
In de volgende paragrafen van dit hoofdstuk zullen de resultaten van de hierboven genoemde stappen worden geanalyseerd. Zoals al beschreven is zullen de effecten van het ADA-systeem geanalyseerd worden op basis van een drietal indicatoren, te weten: de Time To Collision, de standaarddeviatie van de snelheid en de remvertraging. Een nadere omschrijving van deze drie indicatoren is reeds opgenomen in paragraaf 3.5.

4.2 Resultaten Link 7

De eerste link in het netwerk die onderzocht is, is link 7. Link 7 is de link voorafgaand aan de hazard. De hazard heeft een grote invloed op de voertuigen die zich op link 7 bevinden. Voor link 7 is een tweetal analyses uitgevoerd, zowel voor de minuten 2 t/m 9 als voor minuut 1, waarin de hazard aanwezig is op het netwerk (zie ook paragraaf 4.1). Deze beide perioden komen in de onderstaande subparagrafen aan de orde.

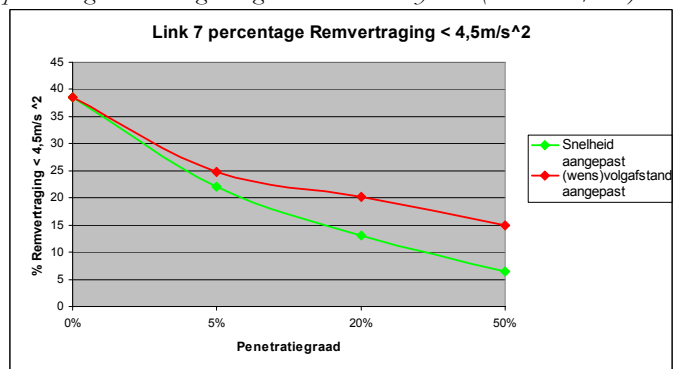
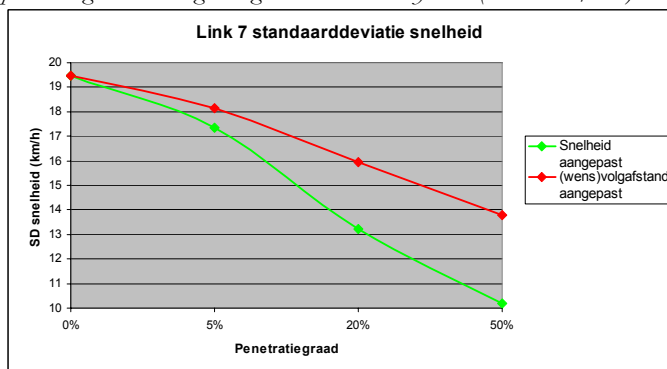
4.2.1 Minuut 2 t/m 9

In deze paragraaf zullen de resultaten van het onderzoek aan de orde komen, voor link 7 minuut 2 t/m 9. De resultaten zullen aan de van onderstaande vier grafieken, grafiek 4.2 A t/m D behandeld worden. In deze vier grafieken (zie ook bijlage 2 t/m 5) zijn de effecten van het ADA-systeem voor de laatste negen minuten uitgezet tegen de drie indicatoren. In deze analyses is de eerste minuut, waarbij de hazard aanwezig is, niet meegenomen. De eerste minuut zal worden behandeld in paragraaf 4.2.2.



Grafiek 4.2 A: Link 7 Percentage TTC kleiner dan 1,0s uitgezet tegen penetratiegraad voertuigen uitgerust met ADA-systeem (minuut 2 t/m 9)

Grafiek 4.2 B: Link 7 Percentage TTC kleiner dan 2,0s uitgezet tegen penetratiegraad voertuigen uitgerust met ADA-systeem (minuut 2 t/m 9)



Grafiek 4.2 C: Link 7 Standaarddeviatie van de snelheid uitgezet tegen penetratiegraad voertuigen uitgerust met ADA-systeem (minuut 2 t/m 9)

Grafiek 4.2 D: Link 7 Percentage remvertraging kleiner dan 4,5m/s² uitgezet tegen penetratiegraad voertuigen uitgerust met ADA-systeem (minuut 2 t/m 9)

Als we de resultaten in de vier grafieken nader bekijken dan valt als eerste op dat bij alle drie de indicatoren sprake is van een sterke afname van de scores t.o.v. de referentiesituatie. Uit deze sterke daling die optreedt, mag worden aangenomen dat het systeem daadwerkelijk effect heeft op de verkeersveiligheid. Alle drie de indicatoren geven een gelijk beeld voor wat betreft de daling. Dit is kan het gevolg zijn van een positieve correlatie tussen de drie indicatoren. Als de correlatie zeer sterk is kunnen de effecten ook met één van deze drie indicatoren beschreven worden. Dit is in dit onderzoek niet onderzocht. Er wordt ook bij de andere links gebruik gemaakt van de drie verschillende indicatoren.

De verschillen tussen de verschillende scenario's en de referentiesituatie zijn allen significant. De verschillen die waargenomen zijn, zijn niet het gevolg van toeval maar kunnen volledig worden toegewezen aan de aanwezigheid van het ADA-systeem.

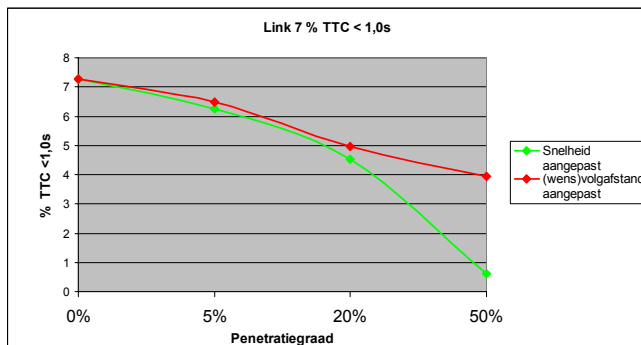
Wat ook opvalt, is dat met stijgende penetratiegraad het systeem meer werkzaamheid krijgt. Naarmate er meer voertuigen uitgerust worden met het systeem neemt de verkeersveiligheid toe. Het systeem werkt met 50% penetratiegraad (en aangepaste snelheid) zelfs zodanig goed dat het percentage TTC kleiner dan 1,0s ongeveer tot nul procent daalt. Echter ook bij een lagere penetratiegraad nemen de scores op de drie indicatoren sterk af en werkt het systeem. In de praktijk zou een dergelijke daling een grote vermindering van het aantal ongevallen kunnen betekenen. Op basis van de penetratiegraad is bekeken of de scenario's significant verschillen. Hierbij zijn de scenario's met gelijke gedragsaanpassing maar met verschillende penetratiegraad met elkaar vergeleken. Een hogere penetratiegraad heeft op basis van de resultaten een significant groter effect op de verkeersveiligheid dan een lagere penetratiegraad.

Opvallend is dat uit alle vier de grafieken blijkt dat een aanpassing van de snelheid over het geheel een sterker effect heeft dan een aanpassing van de (wens)volgafstand. Als de scenario's onderling worden vergeleken, dan blijkt dat bij iedere penetratiegraad een aanpassing van de snelheid een significant groter effect heeft dan een aanpassing van de (wens)volgafstand. Dit is mogelijk het gevolg van de gedragsaanpassing op zich zelf. Bij een aanpassing van de snelheid zijn ook de opvolgende voertuigen (voertuigen die een ADA-voertuig volgen) gedwongen om hun gedrag aan te passen. Ook zij zullen langzamer moeten gaan rijden terwijl bij een aanpassing van de volgafstand in eerste instantie alleen de uitgeruste voertuigen hun gedrag aanpassen. In het bijzonder bij de standaarddeviatie van de snelheid is dit effect waarneembaar. Hier is het verschil tussen beide gedragsaanpassingen het grootste. Aanpassing van de snelheid heeft een significant groter effect op de indicatoren en dus ook op de verkeersveiligheid. Echter hierbij moet worden opgemerkt dat mogelijk de aanpassing van de volgafstand te beperkt is. Voor een eventueel nader onderzoek is het verstandig dat er gevarieerd wordt met de aanpassing van de (wens)volgafstand om zodoende een beter beeld te krijgen van de mogelijkheden van deze gedragsaanpassing.

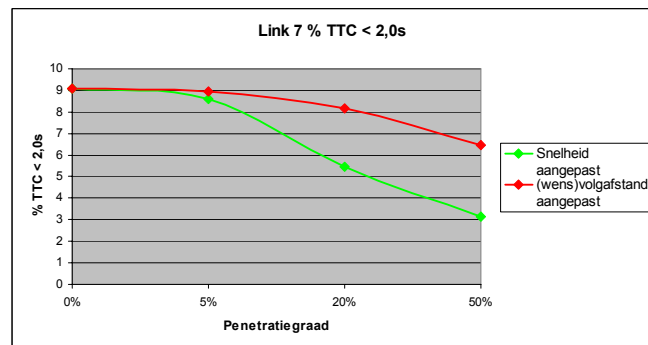
Voor een volledig overzicht van de resultaten zie ook bijlage 2 t/m 4, ook zijn in deze bijlagen grotere versies opgenomen van de grafiek in deze paragraaf. In deze bijlagen wordt tevens de significantie tussen de verschillende scenario's nader toegelicht.

4.2.2 Minuut 1

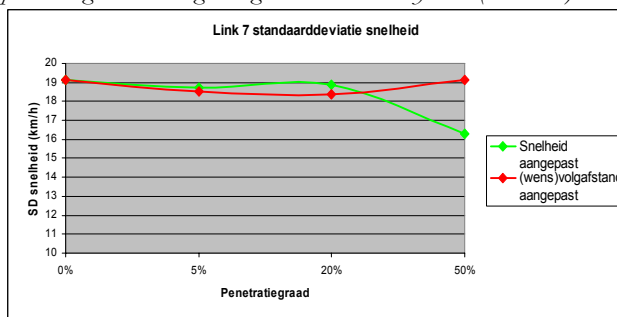
In de vorige paragraaf werden de laatste negen minuten waarin de hazard aanwezig was aan een analyse onderworpen. De eerste minuut week zoals al in paragraaf 4.1 werd aangegeven af van de laatste minuten. In deze paragraaf wordt dan ook de afwijkende eerste minuut bekeken. In onderstaande vier grafieken (grafiek 4.3 A t/m D) zijn de effecten van het ADA-systeem op de verschillende indicatoren weergegeven.



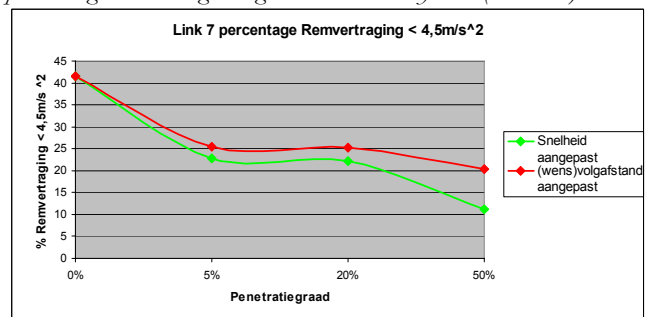
Grafiek 4.3 A: Link 7 Percentage TTC kleiner dan 1,0s uitgezet tegen penetratiegraad voertuigen uitgerust met ADA-systeem (minuut 1)



Grafiek 4.3 B: Link 7 Percentage TTC kleiner dan 2,0s uitgezet tegen penetratiegraad voertuigen uitgerust met ADA-systeem (minuut 1)



Grafiek 4.3 C: Link 7 Standaarddeviatie van de snelheid uitgezet tegen penetratiegraad voertuigen uitgerust met ADA-systeem (minuut 1)



Grafiek 4.3 D: Link 7 Percentage remvertraging kleiner dan 4,5m/s² uitgezet tegen penetratiegraad voertuigen uitgerust met ADA-systeem (minuut 1)

Evenals bij de laatste negen minuten is er in de grafieken te zien dat het ADA-systeem daadwerkelijk effect heeft op de verkeersveiligheid. Twee van de drie indicatoren geven een significante afname van de hoge scores op de indicatoren weer. Deze dalingen zijn in de eerste minuut echter minder sterk dan in de laatste negen minuten. Ook is de daling van de score op de verschillende indicatoren veel grilliger dan in de laatste negen minuten. Mogelijke oorzaak voor deze kleinere dalingen is dat er in de eerste minuut nog niet voldoende voertuigen zijn gewaarschuwd voor de hazard. Bij een kleine penetratiegraad kan het voorkomen dat voertuigen, niet uitgerust met WILLWARN, de hazard passeren zonder dat er sprake is van een gedragsveranderingen. De kans dat deze voertuigen beïnvloed zijn door een WILLWARN voertuig is zeer beperkt. Op basis hiervan is de afname in de eerste minuut veel beperkter dan in de overige minuten.

Doordat er bij een penetratiegraad van 50% de hazard veel sneller gedetecteerd wordt, is de afname hier wel te verklaren. Bij een dergelijk hoge penetratiegraad zijn ook andere voertuigen genoodzaakt om hun gedrag aan te passen. Dit zorgt ervoor dat de afname alleen maar versterkt wordt. Tevens wordt bij de laatste negen minuten alles nog gemiddeld wat in het geval van de eerste minuut niet het geval is.

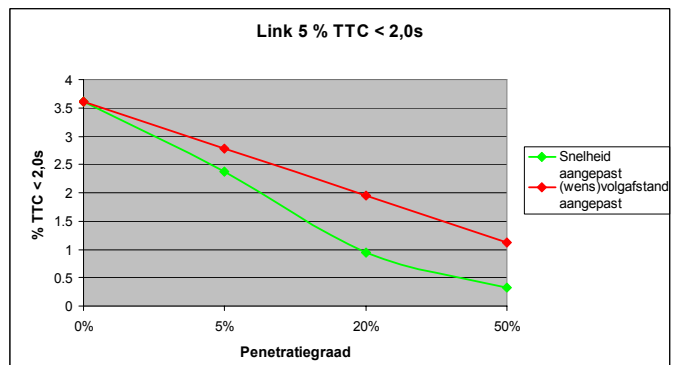
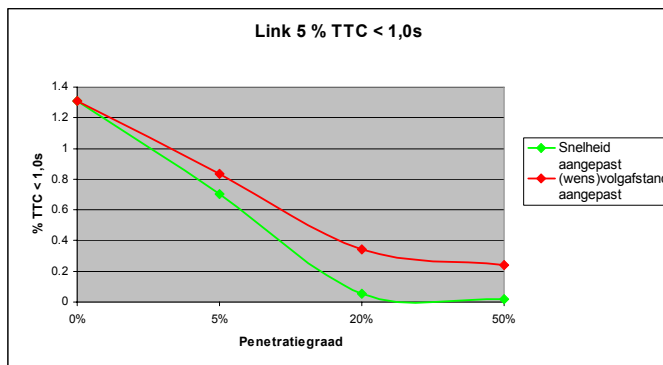
Bij het analyseren van de resultaten op basis van de penetratiegraad blijkt dat een hogere penetratiegraad een sterker effect heeft op de verkeersveiligheid. Naarmate de penetratiegraad toeneemt, neemt de score op een indicator af. In tegenstelling tot de analyse van de laatste negen minuten is de afname niet zo geleidelijk. Zo is bij de remvertraging de afname bij 5% penetratiegraad ongeveer gelijk aan de afname bij 20% penetratiegraad. Alleen bij de hogere penetratiegraden (20% en 50%) is er sprake van significante verschillen. De overige vergelijkingen leveren geen significant verschil op. Dit effect heeft ook te maken met de in de vorige alinea genoemde gevolgen van een hogere penetratiegraad, de invloed op de niet uitgeruste voertuigen.

Net als bij de laatste negen minuten lijkt een aanpassing van de snelheid een groter effect te hebben dan een aanpassing van de (wens)volgafstand. Als deze verschillen op significantie worden onderzocht dan blijkt dat alleen bij de scenario's met 50% penetratiegraad sprake is van een significant verschil tussen beide gedragsaanpassingen. Voor de standaarddeviatie van de snelheid geldt echter iets anders. Bij deze indicator is met uitzondering van de scenario's met 50% penetratiegraad en een aanpassing van de snelheid geen duidelijke daling zichtbaar. Zoals al vermeld is kunnen er in de eerste minuut voertuigen de hazard passeren zonder hierbij beïnvloed te zijn geweest door het ADA-systeem. Toch blijft de score op deze indicator opmerkelijk en kan er geen eenduidige verklaring worden gegeven voor dit effect. Mogelijk zou in een nader onderzoek dit effect nader onderzocht kunnen worden.

Ook voor de eerste minuut zijn de verschillende scenario's en de verschillen tussen de scenario's getoetst op significantie. Een volledig overzicht van de resultaten en de eventuele significante verschillen is opgenomen in bijlagen 2 t/m 4. Ook een groter overzicht van de in deze paragraaf opgenomen grafieken is in deze bijlagen opgenomen.

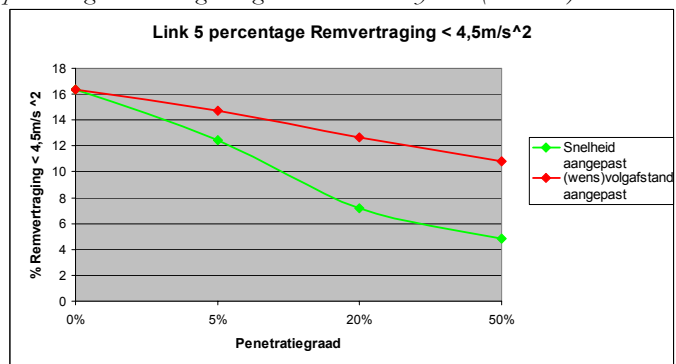
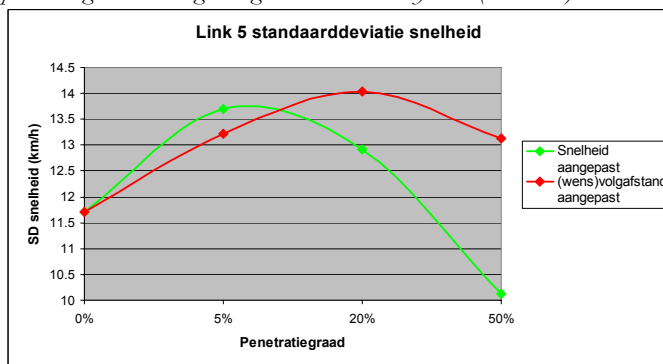
4.3 Resultaten Link 5

De tweede link in het netwerk die onderzocht is, is link 5. Link 5 is de link voorafgaand aan link 7 en wordt ook beïnvloed door de hazard. Echter door de grotere afstand van de hazard is de invloed op deze link veel minder sterk dan op link 7. Voor link 5 is alleen een analyse uitgevoerd van de laatste negen minuten van de hazard. Doordat deze link zich verder van de hazard bevindt is de invloed op deze link al minder sterk en is een analyse van de eerste minuut minder evident. Net als voor link 7 zal eenzelfde analyse worden uitgevoerd voor link 5.



Grafiek 4.4 A: Link 5 Percentage TTC kleiner dan 1,0s uitgezet tegen penetratiegraad voertuigen uitgerust met ADA-systeem (minuut 1)

Grafiek 4.4 B: Link 5 Percentage TTC kleiner dan 2,0s uitgezet tegen penetratiegraad voertuigen uitgerust met ADA-systeem (minuut 1)



Grafiek 4.4 C: Link 5 Standaarddeviatie van de snelheid uitgezet tegen penetratiegraad voertuigen uitgerust met ADA-systeem (minuut 1)

Grafiek 4.4 D: Link 5 Percentage remvertraging kleiner dan $-4,5\text{m/s}^2$ uitgezet tegen penetratiegraad voertuigen uitgerust met ADA-systeem (minuut 1)

Als gekeken wordt naar de vier grafieken (4.4 A t/m D) dan valt als eerste op dat de maximale waarde van de indicator een aanzienlijk stuk lager ligt dan op link 7. Doordat link 5 zich verder van de hazard bevindt heeft deze uiteraard een verminderde invloed. Ook valt op dat, met uitzondering van de standaarddeviatie van de snelheid, een afname te zien is van de scores op de indicatoren. Bij een penetratiegraad van 5% (aangepaste snelheid) is er vreemd genoeg een toename te zien van de standaarddeviatie van de snelheid. Bij aangepaste (wens)volgafstand is deze toename minder sterk (bij 5% penetratiegraad) dan bij een aanpassing van de (wens)volgafstand. De maximale toename wordt pas bereikt bij een penetratiegraad van 20%. Mogelijk leidt een vroegtijdige aanpassing van het gedrag tot veranderende snelheden op link 5. Zo zijn er bij lagere penetratiegraden enkele voertuigen die op link 5 al bezig zijn met het afremmen voor de hazard. Niet uitgeruste voertuigen doen dit niet en

houden hun normale snelheid nog steeds vast. Dit zorgt mogelijk voor een vergroting van de standaarddeviatie in de snelheid. Bij een hogere penetratiegraad zijn er meer voertuigen die hun snelheid al hebben aangepast en zodoende neemt de variatie in de snelheid af. Steeds meer voertuigen die niet uitgerust zijn met het systeem worden beïnvloed door wel uitgeruste voertuigen waardoor dit effect alleen maar versterkt wordt. Bij een aanpassing van de (wens)volgafstand ontstaat er een piek bij een penetratiegraad van 20%. Deze piek is mogelijk te verklaren doordat voertuigen een grote volgafstand aanhouden en zodoende al vroeger beginnen te remmen voor voorgaande voertuigen (die dan inmiddels de hazard al bereikt hebben). Zonder ADA-systeem zouden deze voertuigen pas op link 7 beginnen te remmen. Nu starten zij hier al mee op link 5.

Net als op link 7 is er over het geheel een afname te zien van de hoge scores op de indicatoren. Zeker bij de TTC neemt het percentage gevaarlijke situaties sterk af. Op basis van deze indicator mag aangenomen worden dat het daadwerkelijk veiliger wordt op de weg. Opvallend is dat er bij een aanpassing van de snelheid al bij een penetratiegraad van 20% al sprake is van een percentage TTC < 1,0s, dat ongeveer gelijk is aan nul. De verschillen die optreden tussen de referentiesituatie en de aangepaste scenario's zijn allen significant.

Als alle vier de grafieken worden bekeken dan blijkt dat een aanpassing van de snelheid het meeste effect heeft. Dit bleek ook al uit de resultaten op link 7. Toch blijkt na een analyse op basis van significantie dat dit zeker niet altijd het geval is. Zo is bij de TTC (zowel < 1,0s als < 2,0s) geen sprake van een significant verschil tussen beide gedragsaanpassingen. De afzonderlijke gedragsaanpassingen zijn echter wel significant verschillend van de referentiesituatie. Bij hogere penetratiegraden zijn de scores op de indicatoren zodanig dat er geen sprake meer is van significante verschillen tussen beide gedragsveranderingen. Op basis van de andere twee indicatoren (SD snelheid en remvertraging) is er wel een significant verschil te zien tussen beide gedragsaanpassingen. Een aanpassing van de snelheid heeft hierop een significant groter effect dan aanpassing van de (wens)volgafstand.

Voor een volledig overzicht van de resultaten en een groter overzicht van de grafieken in deze paragraaf zie ook bijlage 5 t/m 7. In deze bijlage is tevens uitleg bij de resultaten gegeven voor wat betreft de eventuele significantie van de resultaten.

5 Conclusies en Aanbevelingen

Op basis van de resultaten die in hoofdstuk 4 zijn geanalyseerd kunnen een aantal conclusies worden verbonden aan de invoering van het WILLWARN. In de komende paragraaf komen deze conclusies aan bod. In paragraaf 5.2 zijn enkele op- en aanmerkingen geplaatst bij de conclusies uit dit onderzoek. Ook zijn in deze discussie enkele aanbevelingen opgenomen om een onderzoek als dit in de toekomst te verbeteren.

5.1 Conclusies

De doelstelling aan het begin van dit onderzoek was om te onderzoeken of ADA-systemen in de toekomst daadwerkelijk bij kunnen dragen aan een verbetering van de verkeersveiligheid. Uit onderzoek van literatuur bleek dat van coöperatieve ADA-systemen een grote bijdrage wordt verwacht op de verkeersveiligheid. Het vervolg van het onderzoek is dan ook gericht op coöperatief ADA-systeem, te weten WILLWARN. Dit systeem is onderworpen aan een simulatieonderzoek waarbij de impact ervan is onderzocht. Op basis van de resultaten kunnen de volgende conclusies worden getrokken

Door bestuurders vroegtijdig te waarschuwen, in het geval van onvoorziene obstakels, wordt het voorafgaand aan het obstakel veiliger. Op basis van de gebruikte indicatoren zijn significante verschillen te zien tussen de referentiesituatie en de scenario's waarin voertuigen uitgerust zijn met WILLWARN. Invoering van het systeem leidt tot een afname van zeer kleine volgafstanden, grote verschillen in snelheid en bestuurders hoeven minder vaak gevaarlijk hard te remmen. Dit alles heeft vertaald naar de praktijk een positief effect op de verkeersveiligheid. In het bijzonder de sterke afname van het hoge percentage TTC kleiner dan 1,0s en 2,0s wijst hierop.

Op basis van de penetratiegraad van het systeem, kan geconcludeerd worden dat het systeem niet alleen werkzaam bij een hoge penetratiegraad (veel voertuigen uitgerust met WILLWARN), maar dat ook bij een lage penetratiegraad significante veranderingen optreden in de verkeersveiligheid. Als er meer voertuigen worden uitgerust met het systeem, toenemende penetratiegraad, dan neemt ook de werkzaamheid van WILLWARN toe wat de verkeersveiligheid alleen maar ten goede komt.

In het onderzoek zijn een tweetal gedragsaanpassingen onderzocht die bestuurders kunnen uitvoeren. Zo zijn er scenario's waarbij bestuurders vroegtijdig hun snelheid aanpassen en scenario's waarbij zij vroegtijdig hun (wens)volgafstand aanpassen. Van beide gedragsveranderingen kan worden gezegd dat zij een positief effect op de verkeersveiligheid. Er werd ook geconcludeerd dat er een onderscheid is tussen beide aanpassingen. Een vroegtijdige aanpassing van de snelheid heeft op basis van de resultaten in dit onderzoek een groter positief effect op de verkeersveiligheid, in vergelijking met een aanpassing van de (wens)volgafstand. Bij een eventuele marktintroductie is het daarom verstandig om bestuurders te adviseren over hoe ze hun gedrag moeten aanpassen als zij een waarschuwing van het systeem hebben ontvangen. Door bestuurders te adviseren hun snelheid vroegtijdig te verlagen kan de effectiviteit van WILLWARN zo hoog mogelijk worden gehouden.

De drie indicatoren die toegepast zijn: TTC, standaarddeviatie snelheid en de verdeling remvertraging lijken alledrie toepasbaar voor dit type onderzoek. Na analyse van de resultaten blijkt dat de indicatoren eenzelfde effect laten zien. Hieruit mag worden geconcludeerd dat de indicatoren onderling gecorreleerd zijn. Voor een eventueel nader onderzoek kan dan ook gebruik worden gemaakt van één van de drie indicatoren. Hierbij gaat de voorkeur uit naar de Time To Collision. Deze heeft van de drie indicatoren de meeste verklarende eigenschappen.

5.2 Discussie

In de vorige paragraaf zijn de conclusies uit dit onderzoek naar voren gekomen. In grote lijnen komt het erop neer dat het WILLWARN een welkome aanvulling kan zijn in voertuigen en daarmee in het verkeer. Toch kunnen er opmerkingen geplaatst worden bij de resultaten uit dit onderzoek en bij de invoering van een dergelijk systeem. In deze paragraaf zullen verschillende op en aanmerkingen geplaatst worden die voor de resultaten mogelijk van belang kunnen zijn.

- In dit onderzoek is gebruik gemaakt van een micro-simulatiemodel om het verkeer, de hazard, het gedrag van bestuurder en voertuig en de indicatoren weer te geven. Om een kritieke situatie als een obstakel op de rijbaan te kunnen vertalen naar een simulatie omgeving zijn aannamen gedaan en meerdere vereenvoudigingen van de werkelijkheid uitgevoerd. Mogelijk leiden deze aannamen en vereenvoudigen tot een overschatting van de effecten van het ADA-systeem en zijn de resultaten te positief. Om de daadwerkelijke effecten van het systeem te onderzoeken is het uitvoeren van een praktijktest een must. Toch mag op basis van de resultaten in dit onderzoek worden aangenomen dat een dergelijk systeem daadwerkelijk bijdraagt aan de verkeersveiligheid. De verschillen tussen de referentiesituatie en de scenario's met het systeem zijn behoorlijk groot.
- Om het Cooperative Safety Device te kunnen toetsten was het noodzakelijk dat het gedrag van de bestuurder naar aanleiding van de waarschuwing werd veranderd. Uiteindelijk is besloten om bestuurders volgens een tweetal verschillende gedragsaanpassingen te laten reageren op een waarschuwing. Uiteraard zijn deze twee gedragsaanpassingen niet de enige mogelijkheden waarmee een bestuurder kan reageren op een gevaarlijke situatie. De twee gebruikte aanpassingen zijn de meest voor de hand liggende aanpassingen die een bestuurder zal maken na een waarschuwing van het systeem. Het is op basis van dit onderzoek dan ook niet mogelijk om "onderbouwde" uitspraken te doen over de gevolgen van de andere gedragsaanpassingen. Voor een eventueel nader onderzoek is het dan ook wenselijk dat eventuele andere gedragsaanpassingen worden onderzocht omdat niet iedere bestuurder hetzelfde zal reageren. Ook is het wenselijk om verschillende gedragsaanpassingen in een enkele simulatie te verwerken. Op deze wijze kan in de simulatie de praktijk nog beter worden benaderd. Wat uiteindelijk kan leiden tot een beter inzicht in de gevolgen van dit ADA-systeem.
- Ook de mate van gedragsaanpassing kan voor een vervolgonderzoek van belang zijn. Niet iedere bestuurder zal in dezelfde mate zijn gedrag aanpassen. Mogelijk kan hiervoor gebruikt gemaakt worden van een simulator onderzoek waarbij men bestuurders laat reageren op een waarschuwing en hun gedrag steeds wordt gemonitord. Met behulp van een dergelijk onderzoek wordt meer duidelijkheid verkregen over hoe bestuurders reageren op een eventuele waarschuwing van WILLWARN.
- Niet alleen de manier waarop de bestuurders hun gedrag aanpassen is bepalend voor de effecten van het WILLWARN. In eerste instantie is het natuurlijk de vraag of zij daadwerkelijk gehoor geven aan de waarschuwing. In dit onderzoek is voor de overzichtelijkheid van het onderzoek aangenomen dat "gewaarschuwd" voor 100% reageren op de waarschuwing. Alle voertuigen die een waarschuwing ontvangen passen hun gedrag op basis van deze waarschuwing aan. In de praktijk zal dit niet altijd het geval zijn, bestuurders zullen mogelijk niet altijd hun gedrag aanpassen of niet allemaal op dezelfde manier. Zeker als gewerkt wordt met een systeem waarbij de verantwoordelijkheid ligt bij de bestuurder om zijn gedrag aan te passen. Doordat het onderzoek is uitgevoerd met

- bestuurders die de waarschuwingen altijd opvolgen kunnen de resultaten mogelijk een te positief beeld vormen. In de praktijk zullen deze resultaten mogelijk ook niet behaald worden. Toch is er een mogelijkheid om het percentage bestuurders dat gehoor geeft aan waarschuwingen te verhogen, zonder bestuurders gedwongen anders te laten reageren. Als het systeem alleen werkt wanneer nodig (geen “vals alarm”, onnodige waarschuwingen) zullen bestuurders sneller geneigd zijn om hun gedrag aan te passen als zij een waarschuwing krijgen.
- Doordat het systeem alleen de bestuurder waarschuwt als er sprake is van een gevaarlijke situatie bestaat het gevaar dat er een soort van gewenning optreedt bij de bestuurder. Mogelijk gaan bestuurders in verregaande mate vertrouwen op het systeem dat zij ervan uit gaan dat als er geen waarschuwing is dat er ook geen sprake is van gevaarlijke omstandigheden. Mocht het systeem door een onbekende oorzaak niet functioneren, dan bestaat het gevaar dat mensen de situatie waarin ze zich bevinden overschatten en er zeer gevaarlijke situaties ontstaan. Het risico dat het systeem door onbekende oorzaak niet functioneert blijft te allen tijde aanwezig. Indien het WILLWARN in de praktijk zal worden toegepast is dit een belangrijk aandachtspunt.

Met de hierboven beschreven op- en aanmerkingen is een einde gekomen aan de rapportage bij dit onderzoek. Op basis van de resultaten geconcludeerd worden dat WILLWARN daadwerkelijk bij kan dragen aan de verkeersveiligheid. Ondanks deze op- en aanmerkingen bij dit onderzoek is het noodzakelijk dat ook in de toekomst deze onderzoeken uitgevoerd worden om vroegtijdig eventuele neveneffecten te registreren.

Bijlagen

Bijlage 1:	Referenties	II
Bijlage 2:	Time To Collision Link 7	VI
Bijlage 3:	Standaarddeviatie Snelheid Link 7	XI
Bijlage 4:	Remvertraging Link 7	XV
Bijlage 5:	Time To Collision Link 5	XIX
Bijlage 6:	Standaarddeviatie Snelheid Link 5	XXII
Bijlage 7:	Remvertraging Link 5	XXIV

Bijlage 1: Referenties

Referenties

Adviesdienst Verkeer en Vervoer (2005); *Het Vachtverkeer in de Spitsperioden op het Hoofdwegennet*; Rotterdam; link:

http://www.rws-avv.nl/servlet/page?_pageid=116&_dad=portal30&_schema=PORTAL30&p_item_type=product&p_theme_id=1893&p_item_id=37353

Archer, J. (2004); *Indicators for traffic safety assessment and prediction and their application in micro-simulation modelling: A study of urban and suburban intersections*; Doctoral thesis, Royal institute of technology, Department of Infrastructure, Division of Transport and Logistics, Centre for Traffic Research, Stockholm

Van Arem, B. De Vos A.P. & Vanderschuren, M.J.W.A (1997); *The microscopic traffic simulation model MIXIC 1.3*; Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Adviesdienst Verkeer en Vervoer, TNO Inro; rapport INRO-VVG 1997-02B; Delft

Bastiaansen, E.G.H.J. & De Hoog; A. (2000); *Automatische voertuiggeleiding met ADA-technologie; perspectieven voor veiligheid en benutting*; Adviesdienst Verkeer en Vervoer, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rotterdam; www.rws-avv.nl

BMW Group, Forschung und Technik (2006); *A new approach for obstacle detection based on dynamic vehicle behaviour*; AMAA Conference Berlin 2006; Contact, R. Lasowski@softlab.de

Evans, L. (1998); *Antilock brake systems and risk of different types of crashes in traffic*; General Motors, Global Research and Development Operations, United States of America, papernr. 98-S2-O-12

Geatmann, D. & Head, L. (2003); *Surrogate Safety Measures From Traffic Simulation Models*; U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, R&D and Technology, Office of Safety Research and Development; McLean, Virginia; Publication no. FHWA-RD-03-050

Hilt, H.F. & Noecker, G. (2004); *D22.35 Link to ProFusion*; Hochschule fur Technik und Wirtschaft des Saarlandes, DaimlerChrysler AG; WILLWARN Deliverable, opdracht van PReVENT; rapportnr. PR-22350-SPD-040524-v11

Van Kampen, B. (2003); *Het ledig gewicht van motorvoertuigen; ontwikkelingen sinds 1985*; Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV; Leidschendam

Van Kampen, B., Krop, W. & Schoon, C. (2005); *Auto's om veilig mee thuis te komen; de prestaties van personenauto's op het gebied van voertuigveiligheid in de afgelopen decennia, en een blik voorruit*; Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV; Leidschendam

Klunder, G., Wilmlink, I. & Feenstra. P. (2006); *Modelling Intelligent Transport Systems – What about the driver?*; TNO Business Unit Mobility and Logistics, Delft; International Symposium of Transport Simulation 2006, Lausanne

Louwerse, W.J.R. (2005); *ADAS Safety Impacts on Rural and Urban Distributor Roads; An analysis of the potential safety effects of ADAS and a simulation study of the effects of ISA*; SWOV Institute for Road Safety Research, the Netherlands; Paper Young Researchers Seminar 2005

Minderhoud, M.M. & Bovy, P.L. (2001); *Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment*; Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Traffic Engineering Section; Delft; Published, Accident Analysis and Prevention 33, (2001) page 89 t/m 97

Minderhoud, M.M. & Hoogendoorn, S.P. (2001); *Extended Time-to-Collision Safety Measures for ADAS Safety Assessment*; Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geo Sciences; Delft; Published, European Journal of Transport and Infrastructure Research no. 3 (2001) page 255 t/m 275

Rijksoverheid Nederland, Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2004); *Nota Mobiliteit; naar een betrouwbare en voorspelbare bereikbaarheid (deel I)*; www.vanAnaarBeter.nl (<http://213.156.8.79/>)

Schaefer, M. & Karduck, A.P. (2005); *Secure and Open Market Platforms for Telematics Services*; Furtwangen University, Faculty of Computer Science, Furtwangen, Germany

Straßberger, M. & Adler, C. (2005); *Lokale Gefahrenwarnung in Fahrzeug – Ad – Hoc – Netzen – Eine umfassende Analyse und aktuelle Lösungsansätze*; BMW Group Forschung und Technik, München

Tampere, C.M.J. (2004); *Human-Kinetic Multiclass Traffic Flow Theory and Modelling, with application to Advanced Driver Assistance Systems in Congestion*; Doctoral thesis; Trail Research School; Delft

Versteegt, E., Klunder, G. & Van Arem, G. (2005); *Modelling cooperative roadside and in-vehicle intelligent transport systems using the ITS – modeller; An integrated umbrella for existing microscopic traffic models*; TNO Business Unit Mobility and Logistics, Delft, Netherlands

Vogel, K. (2003); *A comparison of headway and time to collision as safety indicators*; Swedish National Road and Transport Research Institute; Linköping Sweden; Published, Accident Analysis and Prevention 35, (2003) page 427 t/m 433

Wu⁽¹⁾, H. & Lee⁽²⁾, J. & Hunter⁽²⁾, M. & Fujimoto⁽¹⁾, R. & Guensler⁽²⁾, R.L. & Ko⁽²⁾, J.; *Simulated Vehicle – to – Vehicle message propagation efficiency on Atlanta's I-75 Corridor*; College of Computing⁽¹⁾, School of Civil and Environmental Engineering⁽²⁾, Georgia Institute of Technology; Atlanta; 2004; Published, Intelligent Transportation Systems and Vehicle-Highway Automation 2005, no. 1910, page 82-89

Websites

www.SWOV.nl
www.rws-avv.nl
www.sicurauto.it
www.prevent-ip.org
www.wikipedia.nl
www.vanAnaarBeter.nl

Bijlage 2: Time to Collision Link 7

Minuut 2 t/m 9

$TTC < 1,0s$

Als eerste zal gekeken worden hoe de TTC veranderd door invoering van het ADA-systeem. Zoals al is aangegeven in paragraaf 4.5 zijn in het bijzonder de zeer kleine TTC waarden een indicatie voor een gevaarlijke situatie. Op basis van het percentage TTC kleiner dan 1,0s resp. 2,0s en de bijbehorende standaarddeviatie zullen de verschillende scenario's onderling worden vergeleken. Als eerste zullen de laatste negen minuten van de simulatie worden behandeld.

In alle scenario's waarbij het WILLWARN actief is, is een afname te zien in het percentage TTC kleiner dan 1,0s, zie tabel 2.1. In de basissituatie bedraagt deze waarde $7,24\% \pm 0,37$ terwijl in het meest gunstigste scenario, 50% snelheid aangepast dit percentage $0,36\% \pm 0,06$ bedraagt. De afname van deze waarden is niet het gevolg van eventuele toevalligheden maar deze veranderingen zijn alle significant en te wijten aan de werking van het ADA-systeem. Er mag aangenomen worden dat bij introductie van het WILLWARN het verkeer daadwerkelijk veiliger wordt en dat het voorkomen van een TTC kleiner dan 1,0s verminderd. Indien ook de penetratiegraad onderling wordt getoetst op significante verschillen, dan blijkt ook dat de penetratiegraden onderling significant van elkaar verschillen. Hiertoe zijn de scenario's met aangepaste snelheid en de scenario's met aangepaste (wens)volgafstand onderling vergeleken (5% snelheid met 20% snelheid enz.).

Nr.	Scenario	Gemiddeld % $TTC < 1,0s$	SD (σ)	$E(X-Y)$	$2\sqrt{(\sigma_X + \sigma_Y)}$
1	0 %	7,24 %	$\pm 0,37$		
2	5% snelheid	4,90 %	$\pm 0,31$	2,34	$\pm 0,97$
3	5% volgafstand	5,86 %	$\pm 0,33$	1,38	$\pm 0,99$
4	20% snelheid	1,68 %	$\pm 0,16$	5,56	$\pm 0,81$
5	20% volgafstand	3,31 %	$\pm 0,23$	3,93	$\pm 0,87$
6	50% snelheid	0,36 %	$\pm 0,06$	6,88	$\pm 0,75$
7	50% volgafstand	1,62 %	$\pm 0,16$	5,62	$\pm 0,81$

Tabel 2.1: Analyse Time To Collision kleiner dan 1,0s t.b.v. aantonen significantie verschillende scenario's (minuut 2 t/m 9)

Opvallend gegeven bij de analyse van de resultaten is dat een aanpassing van de snelheid een groter effect kent dan een vroegtijdige aanpassing van de (wens)volgafstand. Om te kunnen aantonen of dit verschil op toeval berust of dat er daadwerkelijk sprake is van een significant verschil is tussen de scenario's onderling (5% snelheid en 5% volgafstand, enz.) eenzelfde analyse uitgevoerd als tussen de referentiesituatie en de scenario's. In tabel 2.2 is deze analyse opgenomen. Uit de analyse blijkt dat de er tussen de verschillende scenario's met gelijke penetratiegraad sprake is van een significant verschil. Het is echter aannemelijk dat als bestuurders daadwerkelijk gebruik maken van het systeem en vroegtijdig hun gedrag aanpassen dat dit ook voor andere omstandigheden het geval zal zijn.

Nr.	Scenario	Gemiddeld % TTC < 1,0s	SD (σ)	$E(X-Y)$	$2\sqrt{(\sigma X + \sigma Y)}$
2	5% snelheid	4,90 %	$\pm 0,31$	0,96	0,91
3	5% volgfstand	5,86 %	$\pm 0,33$		
4	20% snelheid	1,68 %	$\pm 0,16$	1,63	0,56
5	20% volgfstand	3,31 %	$\pm 0,23$		
6	50% snelheid	0,36 %	$\pm 0,06$	1,26	0,34
7	50% volgfstand	1,62 %	$\pm 0,16$		

Tabel 2.2: Analyse t.b.v. antonen significantie tussen verschillende scenario's met gelijke penetratiegraad, op basis van het percentage TTC kleiner dan 1,0s (minuut 2 t/m 9)

TTC < 2,0s

Het percentage TTC kleiner dan 2,0s is ook meegenomen in de analyse. Op link 7, is in de referentiesituatie in 8,64% $\pm 0,38$ gevallen sprake van een TTC kleiner dan 2,0s. Dat dit percentage hoger ligt dan van de TTC kleiner dan 1,0s is redelijk aannemelijk aangezien deze waarde ook in de praktijk sneller voor zal komen. Net als bij de TTC kleiner dan 1,0s zijn de verschillende scenario's getoetst op significantie. Hieruit blijkt, net als bij de TTC kleiner dan 1,0s, dat met 95% zekerheid, alle scenario's significant verschillen van de referentiesituatie (zie ook tabel 2.3). Er mag worden aangenomen dat de afname van de TTC kleiner dan 2,0s daadwerkelijk te wijten is aan de invoering van het WILLWARN en niet berust op toeval. Alle scenario's waarbij het systeem actief is, zijn significant verschillend van de referentiesituatie.

Nr.	Scenario	Gemiddeld % TTC < 2,0s	SD (σ)	$E(X-Y)$	$2\sqrt{(\sigma X + \sigma Y)}$
1	0 %	8,64 %	$\pm 0,34$		
2	5% snelheid	6,71 %	$\pm 0,33$	1,93	$\pm 0,95$
3	5% volgfstand	7,5 %	$\pm 0,34$	1,14	$\pm 0,96$
4	20% snelheid	3,54 %	$\pm 0,25$	5,10	$\pm 0,84$
5	20% volgfstand	5,87 %	$\pm 0,30$	2,77	$\pm 0,91$
6	50% snelheid	1,27 %	$\pm 0,11$	7,37	$\pm 0,71$
7	50% volgfstand	4,1 %	$\pm 0,24$	4,54	$\pm 0,83$

Tabel 2.3: Analyse significantie verschillende scenario's link 7, percentage TTC kleiner dan 2,0s. (minuut 2 t/m 9)

Tevens is geanalyseerd of de scenario's onderling significant verschillen als de penetratiegraad bekeken wordt. Hierbij wordt een analyse uitgevoerd waarbij de scenario's met een aanpassing van de snelheid onderling worden vergeleken enerzijds en een vergelijk tussen scenario's met aangepaste (wens)volgfstand anderzijds. Uit deze analyse blijkt dat tussen alle scenario's met gelijke gedragsaanpassing een significant verschil bestaat. Dit verschil is te wijten aan de grote stappen die genomen worden in de penetratiegraad.

Als laatste is ook geanalyseerd of er tussen scenario's waarbij de snelheid is aangepast en de scenario's waarbij de (wens)volgfstand is aangepast maar met gelijke penetratiegraad ook sprake is van significante verschillen. Uit tabel 2.4 blijkt dat er tussen de verschillende gedragsaanpassingen niet overal een significant verschil optreedt. Bij een penetratiegraad van 5% is geen sprake van een significant verschil tussen een aanpassing van de snelheid en de (wens)volgfstand. Een eerste mogelijke verklaring hiervoor is dat percentage uitgeruste voertuigen zeer laag is. Ten tweede kan dit liggen aan de aard van de indicator zelf. In de praktijk zullen TTC's kleiner dan 2,0s vaker voorkomen dan TTC's kleiner dan 1,0s omdat deze "minder" gevaarlijk zijn en moeilijker te voorkomen.

De gesimuleerde situatie in het onderzoek was erop gericht om juist deze situaties te veroorzaken. De aanpassingen van het gedrag zijn echter redelijk beperkt waardoor deze mogelijk te weinig effect hebben bij een penetratiegraad van 5% om ook voor een TTC kleiner dan 2,0s een sterk effect te hebben.

Nr.	Scenario	Gemiddeld % TTC < 2,0s	SD (σ)	$E(X-Y)$	$2\sqrt{(\sigma X + \sigma Y)}$
2	5% snelheid	6,71 %	$\pm 0,38$	0,79	$\pm 0,95$
3	5% volgafstand	7,5 %	$\pm 0,34$		
4	20% snelheid	3,54 %	$\pm 0,36$	2,33	$\pm 0,78$
5	20% volgafstand	5,87 %	$\pm 0,27$		
6	50% snelheid	1,27 %	$\pm 0,25$	2,83	$\pm 0,53$
7	50% volgafstand	4,1 %	$\pm 0,11$		

Tabel 2.4: Analyse t.b.v. aantonen significantie tussen verschillende scenario's met gelijke penetratiegraad, op basis van het percentage TTC kleiner dan 2,0s (minuut 2 t/m 9)

Minuut 1

TTC < 1,0s

Voor ieder scenario is ook de eerste minuut geanalyseerd, zie ook tabel 2.5. Hiervoor zijn de verschillende analyses ook uitgevoerd. Hieruit blijkt dat met uitzondering van de laatste twee scenario's (50% penetratiegraad) er geen significante verschillen zijn tussen de scenario's. Dit is mogelijk te wijten aan het feit dat in de eerste minuut nog een behoorlijk aantal ongewaarschuwde voertuigen de hazard passeren. Zeker bij de scenario's waarin de penetratiegraad laag is kan dit nog regelmatig voorkomen. Doordat bij hogere penetratiegraden steeds vaker voertuigen worden beïnvloed worden door uitgeruste voertuigen, neemt het percentage TTC kleiner dan 1,0s af. Dit is een mogelijke verklaring voor het wel significant zijn van deze scenario's, dit in tegenstelling tot de andere scenario's.

Nr.	Scenario	Gemiddeld % TTC < 1,0s	SD (σ)	$E(X-Y)$	$2\sqrt{(\sigma X + \sigma Y)}$
1	0 %	7,29 %	$\pm 1,12$		
2	5% snelheid	6,25 %	$\pm 1,04$	1.03	± 3.05
3	5% volgafstand	6,50 %	$\pm 1,06$	0.79	± 3.08
4	20% snelheid	4,51 %	$\pm 0,97$	2.77	± 2.97
5	20% volgafstand	4,95 %	$\pm 1,05$	2.33	± 3.07
6	50% snelheid	0,61 %	$\pm 0,20$	6.67	± 2.27
7	50% volgafstand	3,95 %	$\pm 1,08$	3.34	± 3.12

Tabel 2.5: Analyse Time To Collision kleiner dan 1,0s t.b.v. aantonen significantie verschillende scenario's (minuut 1)

Ook voor de eerste minuut zijn de scenario's onderling met elkaar vergeleken. Hierbij worden de scenario's onderling vergeleken of er significante verschillen zijn als de penetratiegraad bekeken wordt. Uit deze analyse blijkt dat, alleen een vergelijking tussen 20% snelheid aangepast en 50% snelheid aangepast een significant verschil bestaat. De overige scenario's verschillen dus niet significant van elkaar.

Als laatste is ook voor de eerste minuut een analyse uitgevoerd op basis van een gelijke penetratiegraad maar met verschillend gedrag. Ook hieruit blijkt dat alleen de een vergelijking tussen de scenario's met 50% penetratiegraad een significant verschil oplevert, zie ook tabel 2.6.

Nr.	Scenario	Gemiddeld % TTC < 1,0s	SD (σ)	$E(X-Y)$	$2\sqrt{(\sigma X + \sigma Y)}$
2	5% snelheid	6,25 %	$\pm 1,04$	0,25	$\pm 2,96$
3	5% volgfstand	6,50 %	$\pm 1,06$		
4	20% snelheid	4,51 %	$\pm 0,97$	0,44	$\pm 2,87$
5	20% volgfstand	4,95 %	$\pm 1,05$		
6	50% snelheid	0,61 %	$\pm 0,20$	3,34	$\pm 2,20$
7	50% volgfstand	3,95 %	$\pm 1,08$		

Tabel 2.6: Analyse t.b.v. aantonen significantie tussen verschillende scenario's met gelijke penetratiegraad, op basis van het percentage TTC kleiner dan 1,0s (minuut 1)

TTC < 2,0s

Het percentage TTC kleiner dan 2,0s is ook meegenomen in de analyse. Op link 7, in de eerste minuut bedraagt het percentage TTC < 2,0s in de referentiesituatie in 9,09% $\pm 1,04$. Dat dit percentage hoger ligt dan van de TTC kleiner dan 1,0s is redelijk aannemelijk aangezien deze waarde ook in de praktijk sneller voor zal komen. Net als bij de TTC kleiner dan 1,0s zijn de verschillende scenario's getoetst op significantie. Hieruit blijkt dat er alleen sprake is van significantie tussen de referentiesituatie en twee scenario's met aangepaste snelheid (20% pentr. en 50% pentr.), zie ook tabel 2.7. Het systeem draagt op basis van deze gegevens alleen bij aan de verkeersveiligheid als de snelheid wordt aangepast. Een mogelijke verklaring voor deze minder duidelijke afname is dat er in de eerste minuut zich een soort van evenwicht instelt. Doordat de hazard eerst gedetecteerd moet worden kunnen in eerste minuut nog veel voertuigen de hazard passeren zonder gewaarschuwd te zijn. Dit treedt in het bijzonder op als er een lage penetratiegraad is. Hierdoor wijken deze scenario's niet of nauwelijks af van de referentiesituatie.

Nr.	Scenario	Gemiddeld % TTC < 2,0s	SD (σ)	$E(X-Y)$	$2\sqrt{(\sigma X + \sigma Y)}$
1	0 %	9,09 %	$\pm 1,04$		
2	5% snelheid	8,61 %	$\pm 1,05$	0,48	$\pm 2,95$
3	5% volgfstand	8,93 %	$\pm 1,03$	0,16	$\pm 2,92$
4	20% snelheid	5,44 %	$\pm 0,96$	3,65	$\pm 2,82$
5	20% volgfstand	8,16 %	$\pm 1,05$	0,93	$\pm 2,94$
6	50% snelheid	3,17 %	$\pm 0,64$	5,92	$\pm 2,44$
7	50% volgfstand	6,48 %	$\pm 1,09$	2,61	$\pm 3,01$

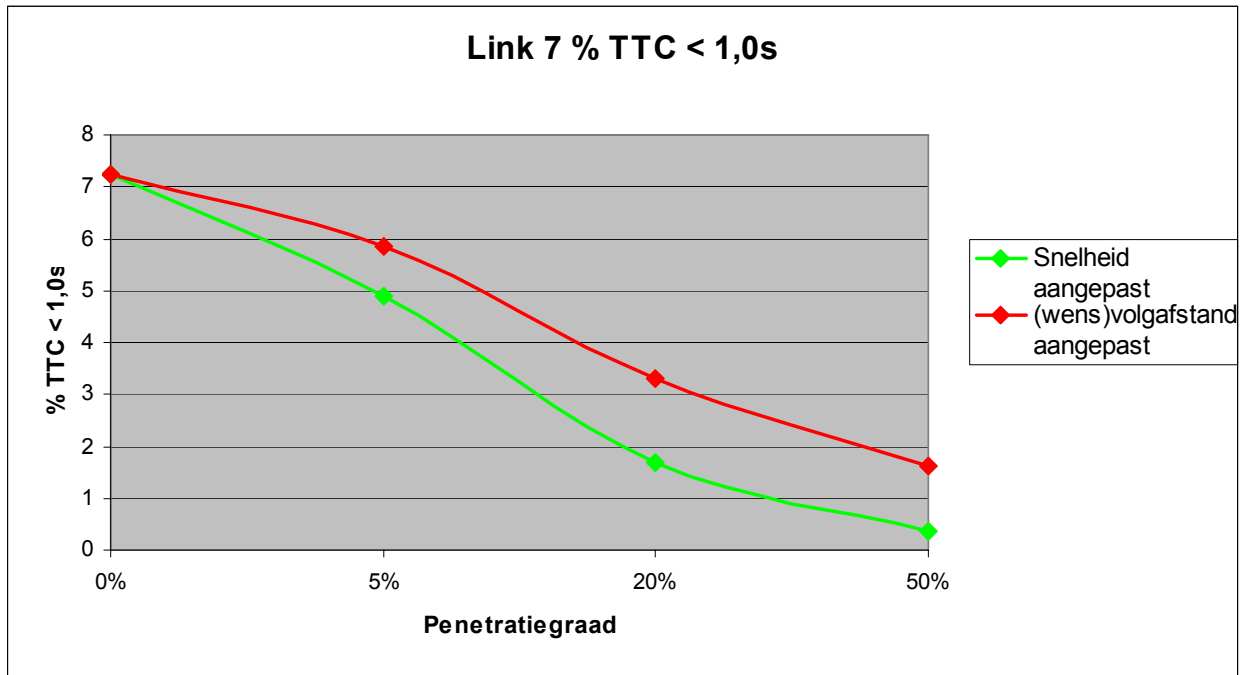
Tabel 2.7: Analyse Time To Collision kleiner dan 2,0s t.b.v. aantonen significantie verschillende scenario's (minuut 1)

Op basis van de penetratiegraad zijn de scenario's ook vergeleken. Hierbij zijn scenario's met gelijke gedragsaanpassing maar veranderende penetratiegraad met elkaar vergeleken. De verschillen tussen scenario's zijn in alle gevallen significant. Het verhogen van de penetratiegraad heeft dus een positief op de verkeersveiligheid, dit blijkt het beste uit de scenario's met aangepaste snelheid. Hierbij is daadwerkelijk een groot onderscheid tussen de referentiesituatie en de aangepaste scenario's.

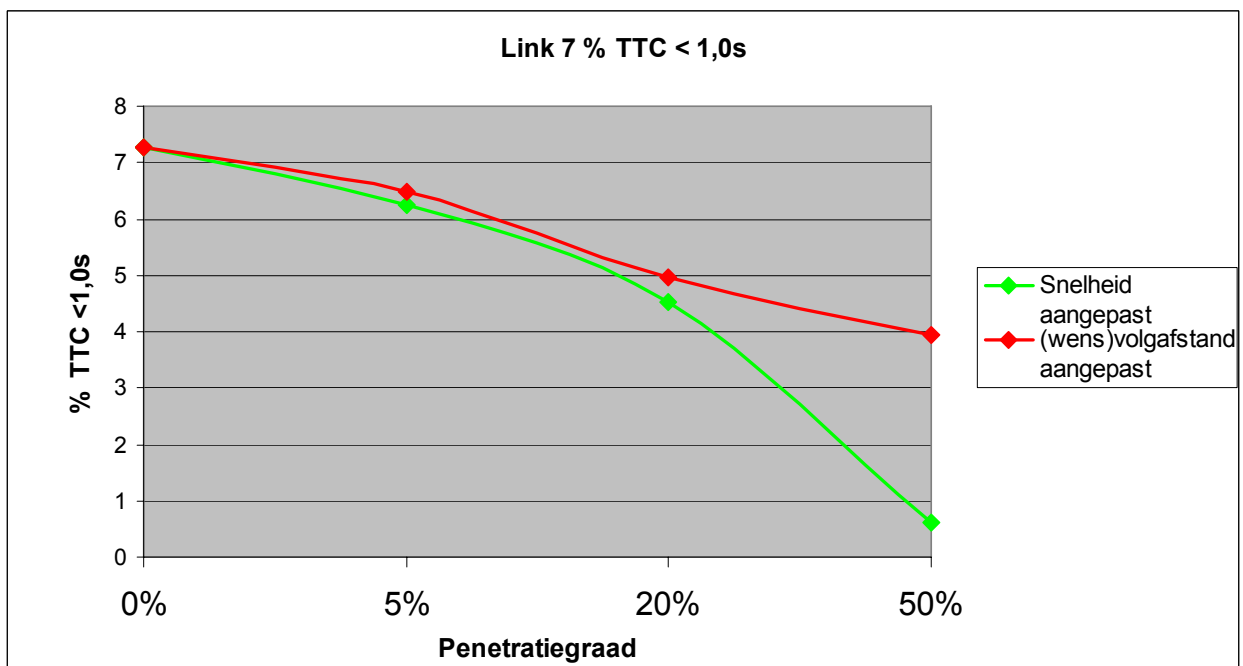
Het verschil tussen beide soorten gedragsaanpassingen zijn ook niet significant met uitzondering van een vergelijk bij een penetratiegraad van 50%. Hieruit blijkt dat aanpassing van de snelheid alleen een significant groter effect heeft bij deze hoge penetratiegraad (zie ook tabel 2.8). Op basis van deze gegevens is het moeilijk om een conclusie hieraan te verbinden. Echter op basis van de andere resultaten op deze link mag toch worden aangenomen dat door een aanpassing van de snelheid het systeem het meeste effectiviteit heeft.

Nr.	Scenario	Gemiddeld % TTC < 2,0s	SD (σ)	$E(X-Y)$	$2\sqrt{(\sigma_X + \sigma_Y)}$
2	5% snelheid	8,61 %	$\pm 1,05$	0,32	$\pm 2,94$
3	5% volgfstand	8,93 %	$\pm 1,03$		
4	20% snelheid	5,44 %	$\pm 0,96$	2,72	$\pm 2,83$
5	20% volgfstand	8,16 %	$\pm 1,05$		
6	50% snelheid	3,17 %	$\pm 0,64$	3,31	$\pm 2,53$
7	50% volgfstand	6,48 %	$\pm 1,09$		

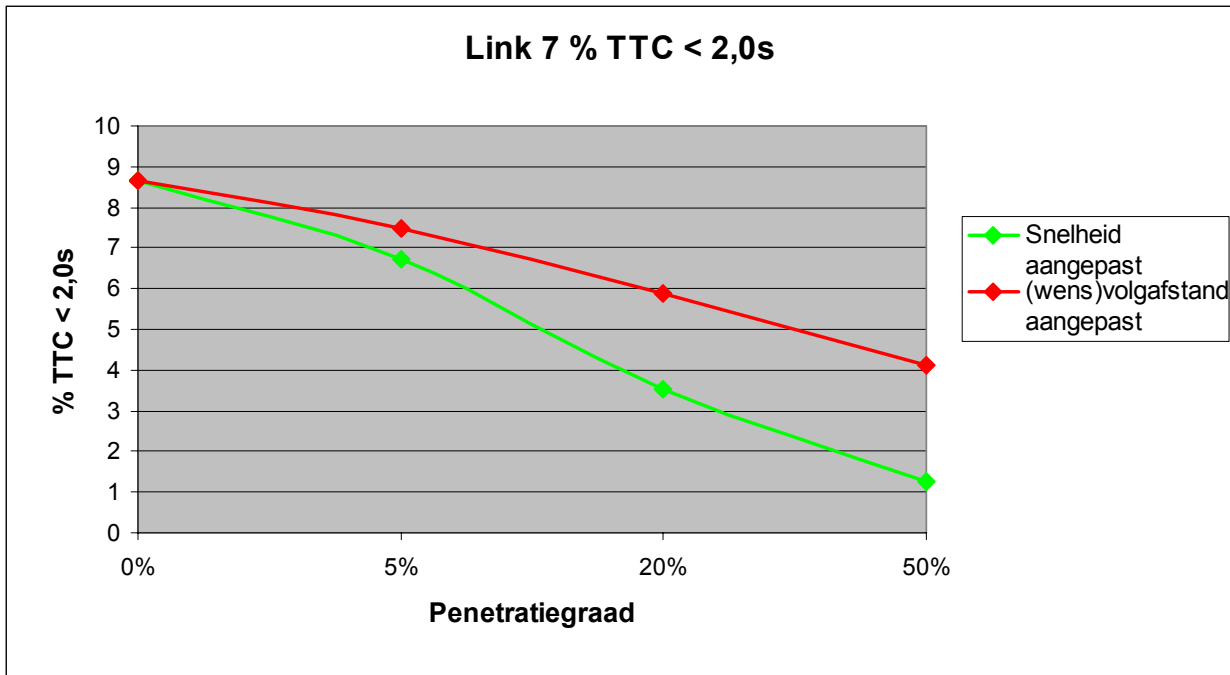
Tabel 2.8: Analyse t.b.v. aantonen significantie tussen verschillende scenario's met gelijke penetratiegraad, op basis van het percentage TTC kleiner dan 2,0s (minuut 1)



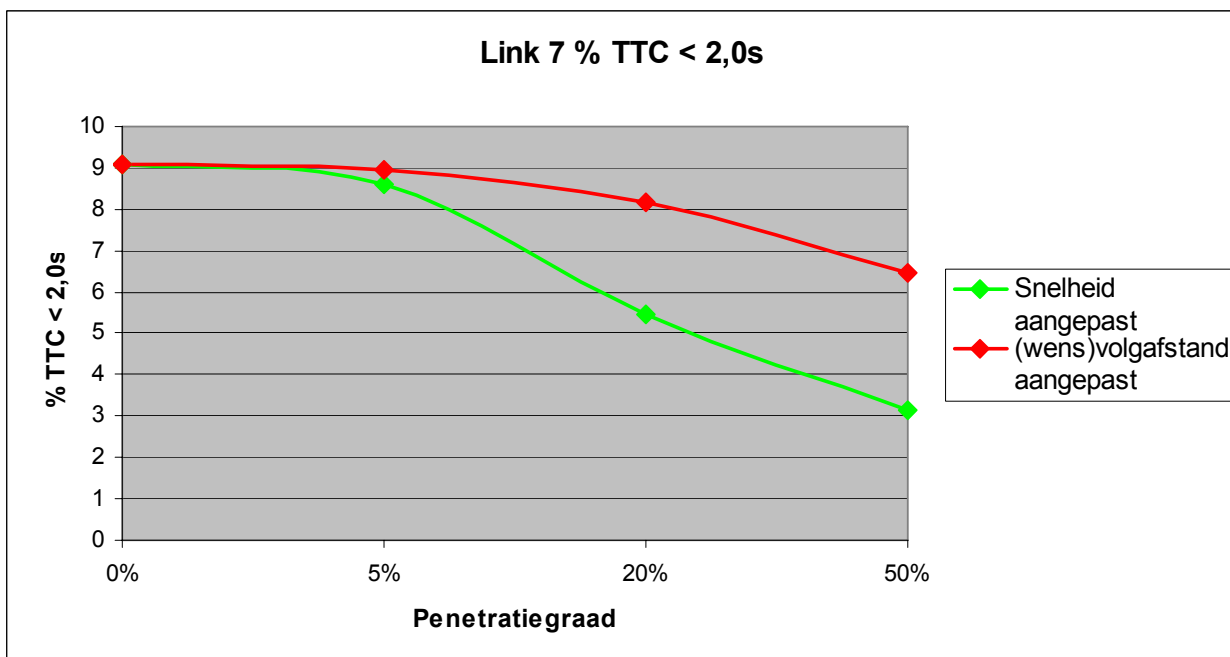
Grafische weergave resultaten, Link 7 Time To Collision kleiner dan 1,0s voor de minuten 2 t/m 9



Grafische weergave resultaten, Link 7 Time To Collision kleiner dan 1,0s voor de eerste minuut



Grafische weergave resultaten, Link 7 Time To Collision kleiner dan 2,0s minuut 2 t/m 9



Grafische weergave resultaten, Link 7 Time To Collision kleiner dan 2,0s eerste minuut

Bijlage 3: Standaarddeviatie Snelheid Link 7

Minuut 2 t/m 9

De tweede indicator die gebruikt is om de effecten te beoordelen is de standaarddeviatie van de snelheid. Evenals bij de Time To Collision zijn de resultaten onderzocht op significantie. Als de resultaten onderling getoetst worden op significantie dan blijkt dat alle scenario's waarin voertuigen uitgerust zijn met het WILLWARN significant verschillen van de referentiesituatie. In de referentiesituatie bedraagt de gemiddelde standaarddeviatie over de laatste negen minuten, 19,48 km/u. In alle overige scenario's neemt de standaarddeviatie van de snelheid significant af, met als grootste afname scenario 50% penetratiegraad en aangepaste snelheid. In dit scenario neemt de gemiddelde standaarddeviatie in de snelheid af tot 10,18 km/u. In vergelijking met de referentiesituatie is neemt de afwijking in de snelheid met de helft af, zie ook tabel 3.1.

Scenario	Standaarddeviatie Snelheid	SD (σ)	$E(X-Y)$	$2\sqrt{(\sigma_X + \sigma_Y)}$
0 %	19,48	$\pm 0,40$		
5% snelheid	17,36	$\pm 0,26$	2,12	$\pm 0,95$
5% volgfstand	18,13	$\pm 0,27$	1,35	$\pm 0,97$
20% snelheid	13,23	$\pm 0,20$	6,25	$\pm 0,90$
20% volgfstand	15,94	$\pm 0,21$	3,54	$\pm 0,90$
50% snelheid	10,18	$\pm 0,12$	9,3	$\pm 0,84$
50% volgfstand	13,78	$\pm 0,18$	5,7	$\pm 0,88$

Tabel 3.1: Analyse significantie verschillende scenario's op basis van de standaarddeviatie van de snelheid op link (minuut 2 t/m 9)

Zoals al is aangetoond, is er sprake van een significante afname van de standaarddeviatie van de snelheid. Een afname van de standaarddeviatie geeft aan dat de snelheidsverschillen tussen de voertuigen afnemen. Deze afname heeft op een tweetal manieren een positief effect op de verkeersveiligheid. Ten eerste neemt door de verminderde snelheidsverschillen de kans op een ongeval af. Kleinere snelheidsverschillen kunnen immers eenvoudiger worden teniet worden gedaan door te remmen. Een verkleining van de snelheidsverschillen heeft in de praktijk ook een positief effect op de gevolgen van eventuele ongevallen. Grote snelheidsverschillen leiden vaak tot ongevallen met ernstige gevolgen. Dit in tegenstelling tot ongevallen waarin sprake is van kleinere snelheidsverschillen. Ongevallen met kleine snelheidsverschillen hebben vaak veel minder ernstige gevolgen.

Tevens is geanalyseerd of de scenario's met gelijke gedragsaanpassing onderling significant verschillen als de penetratiegraad bekeken wordt. Hierbij wordt een analyse uitgevoerd waarbij de scenario's met een aanpassing van de snelheid onderling worden vergeleken enerzijds en een vergelijk tussen scenario's met aangepaste (wens)volgfstand anderzijds. Uit deze analyse blijkt dat tussen alle scenario's met gelijke gedragsaanpassing een significant verschil bestaat. Een mogelijke oorzaak hiervoor is dat de stappen die gemaakt worden in de penetratiegraad erg groot zijn.

Nr.	Scenario	Standaarddeviatie Snelheid	SD (σ)	$E(X-Y)$	$2\sqrt{(\sigma X + \sigma Y)}$
2	5% snelheid	17,36	± 0.26	0,77	$\pm 0,75$
3	5% volgafstand	18,13	± 0.27		
4	20% snelheid	13,23	± 0.20	2,71	$\pm 0,58$
5	20% volgafstand	15,94	± 0.21		
6	50% snelheid	10,18	± 0.12	3,60	$\pm 0,43$
7	50% volgafstand	13,78	± 0.18		

Tabel 3.2: Analyse t.b.v. aantonen significantie tussen verschillende scenario's met gelijke penetratiegraad, op basis van standaarddeviatie van de snelheid

Als de scenario's onderling vergeleken worden op basis van de penetratiegraad dan blijkt ook hier dat de verschillen die optreden significant zijn. Hieruit blijkt dat in alle gevallen een aanpassing van de snelheid het meeste effect heeft op de standaarddeviatie van de snelheid. Deze effecten liggen eigenlijk voor de hand. Doordat er bij de aanpassing van de snelheid voertuigen een vaste snelheid aanhouden zal uiteraard de standaarddeviatie van de snelheid een groot effect hebben. Dit effect versterkt uiteraard bij een toename van de penetratiegraad. Andere voertuigen worden veel sterker beïnvloed door een aanpassing van de snelheid dan door een aanpassing van de (wens)volgafstand van individuele voertuigen.

Minuut 1

Ook voor de standaarddeviatie van de snelheid is de eerste minuut afzonderlijk bekeken. Uit de analyse blijkt dat er tussen de referentiesituatie en de overige scenario's geen significante verschillen optreden, zie tabel 3.3. De afname die te zien is bij het scenario, 50% penetratiegraad aangepaste snelheid, is geen significant verschil. In het geval van een nader onderzoek is het verstandig om de eerste minuut van de hazard beter te onderzoeken. De effecten die in de eerste minuut optreden zijn op basis van de beschikbare resultaten niet eenvoudig te verklaren.

Scenario	Standaarddeviatie Snelheid	SD (σ)	$E(X-Y)$	$2\sqrt{(\sigma X + \sigma Y)}$
0 %	19,15	$\pm 1,48$		
5% snelheid	18,71	$\pm 1,15$	0,45	$\pm 3,75$
5% volgafstand	18,52	$\pm 1,15$	0,63	$\pm 3,75$
20% snelheid	18,87	$\pm 0,66$	0,28	$\pm 3,25$
20% volgafstand	18,37	$\pm 0,92$	0,78	$\pm 3,49$
50% snelheid	16,31	$\pm 0,38$	2,84	$\pm 3,06$
50% volgafstand	19,14	$\pm 0,65$	0,02	$\pm 3,24$

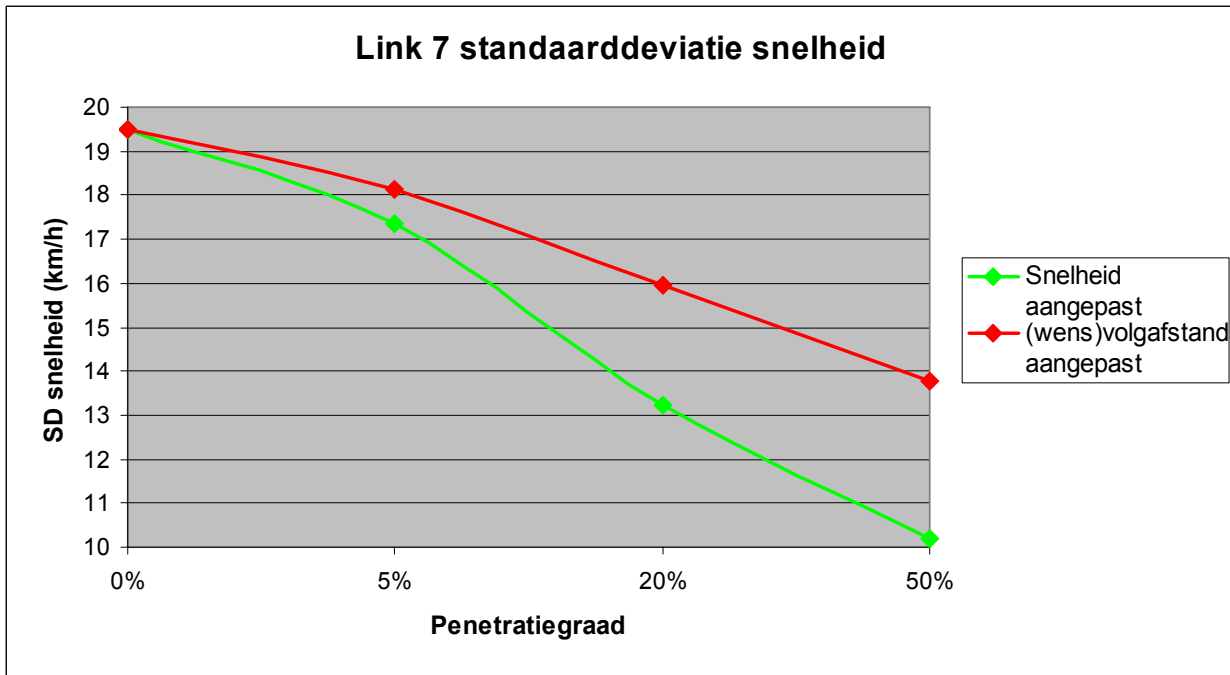
Tabel 3.3: Analyse significantie verschillende scenario's op basis van de standaarddeviatie van de snelheid op link (minuut 1)

Ook als eerste minuut geanalyseerd wordt op basis van de penetratiegraad, maar met gelijke gedragsaanpassing dan zijn er met uitzondering van, 20% snelheid aangepast en 50% snelheid aangepast geen significante verschillen te zien. De significante afname die optreedt na een verhoging van de penetratiegraad naar 50% is niet eenduidig te verklaren. Bij 50% penetratiegraad is het aannemelijk dat bijna alle voertuigen uitgerust met het ADA-systeem in de eerste minuut gewaarschuwd zijn en deze dus hun snelheid vroegtijdig aanpassen. Toch is een nader onderzoek naar de eerste minuut wenselijk.

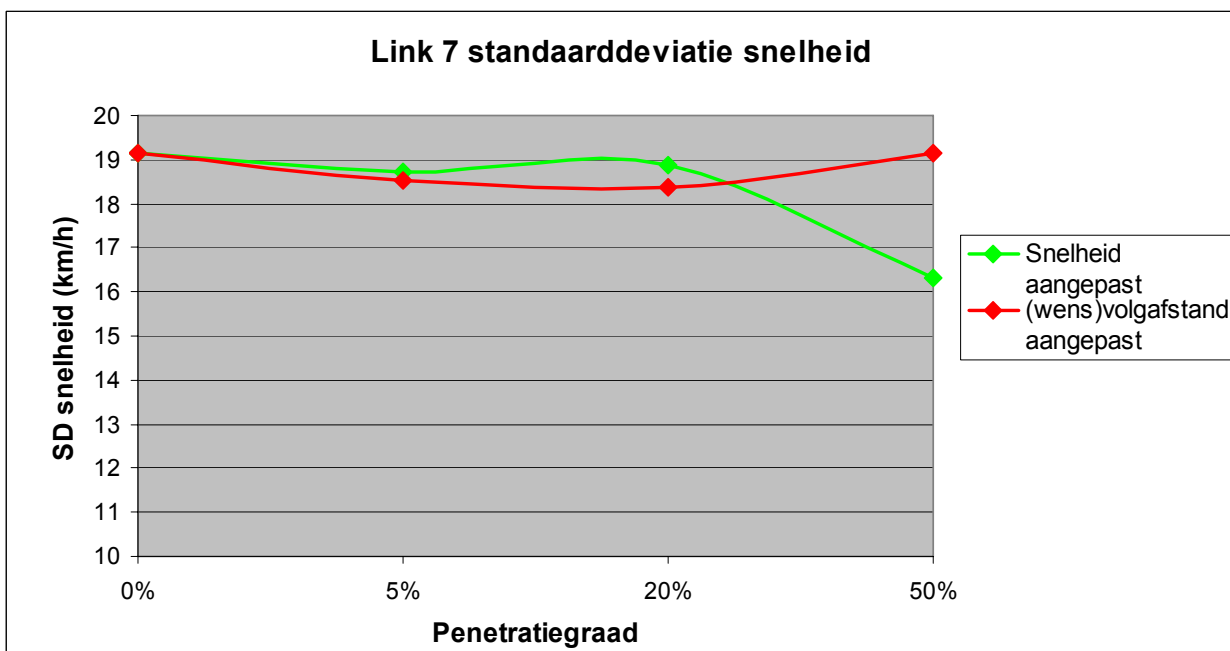
Nr.	Scenario	Standaarddeviatie Snelheid	SD (σ)	$E(X-Y)$	$2\sqrt{(\sigma X + \sigma Y)}$
2	5% snelheid	18,71	$\pm 1,15$	0,19	$\pm 3,24$
3	5% volgafstand	18,52	$\pm 1,15$		
4	20% snelheid	18,87	$\pm 0,66$	0,50	$\pm 2,26$
5	20% volgafstand	18,37	$\pm 0,92$		
6	50% snelheid	16,31	$\pm 0,38$	2,82	$\pm 1,50$
7	50% volgafstand	19,14	$\pm 0,65$		

Tabel 3.4: Analyse t.b.v. aantonen significantie tussen verschillende scenario's met gelijke penetratiegraad, op basis van standaarddeviatie van de snelheid

Als laatste is ook voor de eerste minuut geanalyseerd of er significante verschillen optreden tussen de beide gedragsaanpassingen. Zoals te zien is in bovenstaande tabel 3.4 is er alleen een significant verschil in het geval van een penetratiegraad van 50%. In de overige gevallen zijn er geen significante verschillen waar te nemen met 95% zekerheid. Ook hiervoor geldt weer dat er mag worden aangenomen dat een aanpassing van de snelheid een groter effect heeft op de standaarddeviatie van de snelheid. Hoewel dit een voor de hand liggende conclusie is, doordat de voertuigen gedwongen worden hun snelheid aan te passen naar een vooraf ingestelde waarde.



Grafische weergave resultaten, Link 7 Standaarddeviatie Snelheid minuut 2 t/m 9



Grafische weergave resultaten, Link 7 Standaarddeviatie Snelheid eerste minuut

Bijlage 4: Remvertraging $< 4,5\text{m/s}^2$ Link 7

Minuut 2 t/m 9

Als derde indicator is gebruik gemaakt van de verdeling in de acceleratie. Aan de hand van deze indicator is het mogelijk om te zien of er veel voertuigen sterk moeten vertragen. Hoe hoger het percentage met sterke vertragingen, deceleratie kleiner dan $-4,5\text{m/s}^2$, hoe groter de kans is dat er in de praktijk een ongeval optreedt. Als een voertuig zodanig sterk moet vertragen, is dit meestal het gevolg van een reactie om een gevaarlijke situatie af te wenden. Indien het percentage sterke vertragingen afneemt mag aangenomen worden dat er een verbetering optreedt in de verkeersveiligheid. Ook voor deze derde indicator is een tabel opgesteld waarin de veranderingen zijn opgenomen, zie tabel 4.1

Scenario	Percentage remvertraging $< 4,5\text{m/s}^2$	SD (σ)	$E(X-Y)$	$2\sqrt{(\sigma X + \sigma Y)}$
0 %	38,53 %	$\pm 1,58$		
5% snelheid	22,05 %	$\pm 0,96$	16,48	$\pm 3,70$
5% volgfstand	24,72 %	$\pm 0,98$	13,81	$\pm 3,72$
20% snelheid	13,00 %	$\pm 0,69$	25,53	$\pm 3,45$
20% volgfstand	20,21 %	$\pm 0,91$	18,32	$\pm 3,65$
50% snelheid	6,51 %	$\pm 0,32$	32,02	$\pm 3,22$
50% volgfstand	14,90 %	$\pm 0,69$	23,63	$\pm 3,45$

Tabel 4.1: Percentages remvertraging kleiner dan $4,5\text{m/s}^2$ met bijbehorende standaarddeviatie

Zoals blijkt verschillen alle scenario's significant van de referentiesituatie met 95% zekerheid. Het percentage remvertragingen kleiner dan $-4,5\text{m/s}^2$ neemt in ieder scenario sterk af, met als positieve uitschieter scenario, 50% penetratiegraad snelheid aangepast. In dit scenario is het percentage zeer sterke remvertragingen afgenomen tot ongeveer 6,5% ($\pm 3,22$). Het afnemen van deze sterke remvertragingen kan terug vertaald worden naar de praktijk situatie. Voertuigen hoeven alleen sterk af te remmen als de situatie dit vereist. Door vroegtijdig de snelheid van de voertuigen aan te passen is er geen noodzaak meer om zeer sterk te vertragen. Doordat in principe alle voertuigen worden beïnvloed door het ADA-systeem (aanpassen snelheid aan voorganger) werkt dit sterk door op de remvertraging en is verschil tussen referentiesituatie en het meest optimale scenario zo groot.

Als de scenario's vergeleken worden op basis van de penetratiegraad dan blijkt dat er tussen alle combinaties significante verschillen bestaan. Hiertoe zijn de scenario's met gelijke gedragsaanpassing maar met andere penetratiegraden met elkaar vergeleken. Een verhoging van de penetratiegraad heeft dus een positief effect op de verkeersveiligheid.

Nr.	Scenario	Percentage remvertraging $< 4,5\text{m/s}^2$	SD (σ)	$E(X-Y)$	$2\sqrt{(\sigma X + \sigma Y)}$
2	5% snelheid	22,05 %	$\pm 0,96$	2,67	$\pm 2,74$
3	5% volgfstand	24,72 %	$\pm 0,98$		
4	20% snelheid	13,00 %	$\pm 0,69$	7,21	$\pm 2,28$
5	20% volgfstand	20,21 %	$\pm 0,91$		
6	50% snelheid	6,51 %	$\pm 0,32$	8,39	$\pm 1,52$
7	50% volgfstand	14,90 %	$\pm 0,69$		

Tabel 6.6: Analyse t.b.v. aantonen significantie tussen verschillende scenario's met gelijke penetratiegraad, op basis van standaarddeviatie van de snelheid

Als laatste is ook voor deze indicator een analyse uitgevoerd tussen de beide gedragsaanpassingen. Met uitzondering van de scenario's met een penetratiegraad van 5% bestaan er tussen beide gedragsaanpassingen significante verschillen. Een aanpassing van de snelheid heeft een groter positief effect op de hoeveelheid sterke remvertragingen. Dit is echter ook voor een gedeelte toe te wijzen aan de aard van de indicator. Doordat voertuigen vroegtijdig hun snelheid hebben aangepast is de noodzaak om sterk te vertragen op het laatste moment niet meer aan de orde. Mogelijk leidt dit tot een overschatting van de effecten van het ADA-systeem op basis van deze indicator.

Minuut 1

Scenario	Percentage remvertraging $< 4,5\text{m/s}^2$	SD (σ)	$E(X-Y)$	$2\sqrt{(\sigma X + \sigma Y)}$
0 %	41,51 %	$\pm 4,96$		
5% snelheid	22,80 %	$\pm 1,94$	18,71	$\pm 10,64$
5% volgafstand	25,55 %	$\pm 1,92$	15,96	$\pm 10,64$
20% snelheid	22,20 %	$\pm 2,18$	19,32	$\pm 10,83$
20% volgafstand	25,23 %	$\pm 2,11$	16,28	$\pm 10,77$
50% snelheid	11,19 %	$\pm 1,55$	30,33	$\pm 10,39$
50% volgafstand	20,31 %	$\pm 2,10$	21,20	$\pm 10,77$

Tabel 4.1: Percentages remvertraging kleiner dan $4,5\text{m/s}^2$ met bijbehorende standaarddeviatie

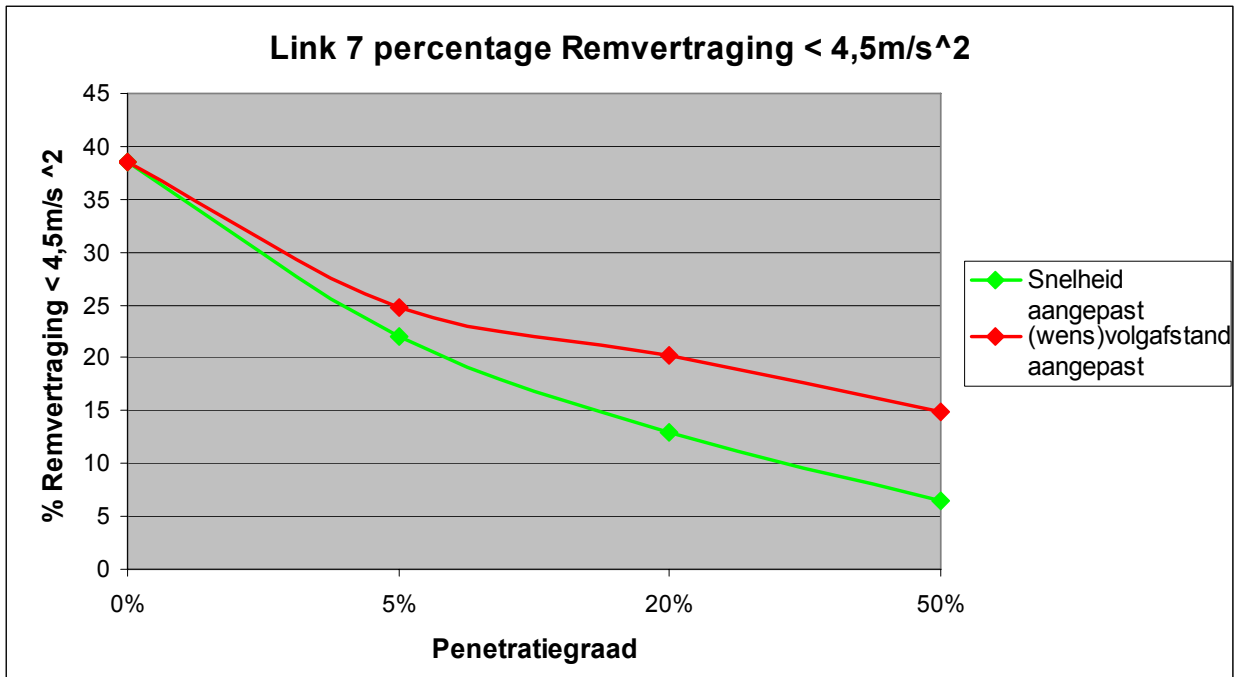
Ook voor de eerste minuut zijn deze analyses uitgevoerd voor wat betreft significantie van de resultaten. Als de verschillende scenario's vergeleken worden met de referentiesituatie dan blijkt dat op basis van de remvertraging alle ADA-scenario's significant verschillen. In het scenario met 50% penetratiegraad en aangepaste snelheid is er zelfs een afname van het percentage remvertraging tot 11,19% ($\pm 10,19$). Echter ook in de scenario's met een lage penetratiegraad is er al sprake van een sterke afname. In vergelijking met de laatste negen minuten is er echter wel veel meer spreiding in de resultaten. Doordat de resultaten niet meer gemiddeld worden is dit verschil wel te verklaren.

Als de resultaten op basis van de penetratiegraad met elkaar worden vergeleken (5% penetratiegraad snelheid aangepast en 20% penetratiegraad snelheid aangepast), dan blijkt dat er maar tussen twee scenario's (20% pentr snelheid aangepast en 50% pentr. snelheid aangepast) een significant verschil is. Dit is ook te zien in de grafieken opgenomen in deze bijlage. Bij een lage penetratiegraad is al sprake van een sterke afname van percentage sterke remvertragingen. Bij een penetratiegraad van 20% is er geen sprake van een significante afname. Een eenduidige verklaring voor dit effect is echter niet te geven.

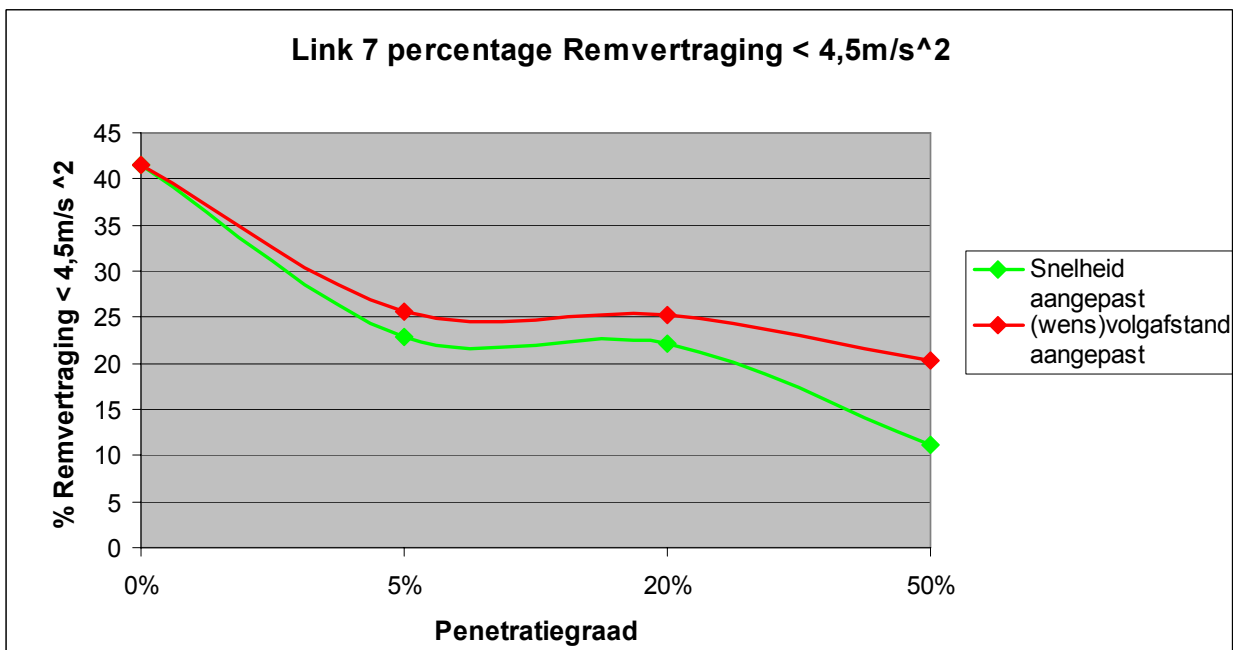
Nr.	Scenario	Percentage remvertraging < 4,5m/s ²	SD (σ)	$E(X-Y)$	$2\sqrt{(\sigma X + \sigma Y)}$
2	5% snelheid	22,80 %	$\pm 1,94$	2,75	$\pm 5,46$
3	5% volgfstand	25,55 %	$\pm 1,92$		
4	20% snelheid	22,20 %	$\pm 2,18$	3,04	$\pm 6,06$
5	20% volgfstand	25,23 %	$\pm 2,11$		
6	50% snelheid	11,19 %	$\pm 1,55$	9,13	$\pm 5,22$
7	50% volgfstand	20,31 %	$\pm 2,10$		

Tabel 6.6: Analyse t.b.v. aantonen significantie tussen verschillende scenario's met gelijke penetratiegraad, op basis van standaarddeviatie van de snelheid

Als er een vergelijking wordt uitgevoerd tussen de verschillende gedragsaanpassingen dan blijkt dat er alleen bij een penetratiegraad van 50% sprake is van een significant verschil. Hieruit mag worden geconcludeerd dat alleen bij een hogere penetratiegraad een aanpassing van de snelheid meer effect heeft op de verkeersveiligheid. Bij een hogere penetratiegraad worden niet uitgeruste voertuigen vaker beïnvloed door wel uitgeruste voertuigen. Bij een aanpassing van de snelheid is dit effect veel sterker dan bij een aanpassing van de (wens)volgfstand. Aanpassing van de (wens)volgfstand heeft in eerste instantie alleen effect op de uitgeruste voertuigen, terwijl een aanpassing van de snelheid doorwerkt op het gehele netwerk.



Grafische weergave resultaten, Link 7 Percentage remvertragingen kleiner dan -4,5 m/s² minuut 2 t/m 9



Grafische weergave resultaten, Link 7 Percentage remvertragingen kleiner dan -4,5 m/s² eerste minuut

Bijlage 5: Time To Collision link 5

De resultaten uit de simulatie zijn samengevat in onderstaande grafieken. In deze bijlage worden de gegevens van link 5 nader geanalyseerd. De invloed van de hazard is op deze link kleiner dan op link 7, doordat deze link zich verder van de hazard bevindt. Op basis hiervan is besloten de eerste minuut van de hazard voor deze link niet nader te onderzoeken. In deze analyses zijn alleen de minuten 2 t/m 9 opgenomen.

TTC < 1,0s

Wat meteen opvalt, is dat de invloed van de hazard op deze link veel kleiner is dan op link 7. Dit is uiteraard het gevolg van de grotere afstand tussen de hazard en deze link. Toch is bij alle scenario's waarbij het WILLWARN actief is, een afname te zien in het percentage TTC kleiner dan 1,0s, zie tabel 5.1. In de basissituatie bedraagt deze waarde $1,31\% \pm 0,17$ terwijl in het meest gunstigste scenario, 50% snelheid aangepast dit percentage $0,02\% \pm 0,01$ bedraagt. De afname van deze waarden is niet het gevolg van eventuele toevalligheden maar deze veranderingen zijn alle significant en te wijten aan de werking van het ADA-systeem. Er mag aangenomen worden dat bij introductie van het WILLWARN het verkeer daadwerkelijk veiliger wordt en dat het voorkomen van een TTC kleiner dan 1,0s verminderd.

Nr.	Scenario	Gemiddeld % TTC < 1,0s	SD (σ)	$E(X-Y)$	$2\sqrt{(\sigma X + \sigma Y)}$
1	0 %	1,31 %	$\pm 0,17$		
2	5% snelheid	0,70 %	$\pm 0,12$	0,61	$\pm 0,41$
3	5% volgfstand	0,83 %	$\pm 0,14$	0,48	$\pm 0,44$
4	20% snelheid	0,06 %	$\pm 0,04$	1,26	$\pm 0,35$
5	20% volgfstand	0,34 %	$\pm 0,08$	0,97	$\pm 0,38$
6	50% snelheid	0,02 %	$\pm 0,01$	1,29	$\pm 0,34$
7	50% volgfstand	0,24 %	$\pm 0,05$	1,07	$\pm 0,35$

Tabel 5.1: Analyse Time To Collision kleiner dan 1,0s, link 5 t.b.v. aantonen significantie verschillende scenario's (minuut 2 t/m 9)

Indien ook de penetratiegraad onderling wordt getoetst op significante verschillen, dan blijkt ook dat de penetratiegraden onderling significant van elkaar verschillen. Hiertoe zijn de scenario's met aangepaste snelheid en de scenario's met aangepaste (wens)volgfstand onderling vergeleken (5%snelheid met 20%snelheid enz.). Op basis hiervan mag worden aangenomen dat een verhoging van de penetratiegraad leidt tot een verbetering van de verkeersveiligheid. Ook mag hierdoor worden aangenomen dat het systeem daadwerkelijk bijdraagt aan de verkeersveiligheid.

Nr.	Scenario	Gemiddeld % TTC < 1,0s	SD (σ)	$E(X-Y)$	$2\sqrt{(\sigma X + \sigma Y)}$
2	5% snelheid	0,70 %	$\pm 0,12$	0,37	$\pm 0,13$
3	5% volgfstand	0,83 %	$\pm 0,14$		
4	20% snelheid	0,06 %	$\pm 0,04$	0,19	$\pm 0,29$
5	20% volgfstand	0,34 %	$\pm 0,08$		
6	50% snelheid	0,02 %	$\pm 0,01$	0,11	$\pm 0,22$
7	50% volgfstand	0,24 %	$\pm 0,05$		

Tabel 5.2: Analyse t.b.v. aantonen significantie tussen verschillende scenario's met gelijke penetratiegraad, op basis van het percentage TTC kleiner dan 2,0s (minuut 2 t/m 9)

Ook is bekeken welke van de twee gedragsaanpassingen het grootste effect heeft op de verkeersveiligheid. Voor link 5 levert dit een enigszins afwijkend beeld op. Bij een penetratiegraad van 5% heeft een aanpassing van de snelheid een significant groter effect dan een aanpassing van de (wens)volgafstand. Bij een hogere penetratiegraad maakt het niet uit welke gedragsaanpassing wordt toegepast. Er is dan geen sprake meer van een significant verschil tussen beide gedragsaanpassingen (zie ook tabel 5.2). Dit is gebaseerd op de indicator TTC kleiner dan 1,0s. Voor dit verschijnsel is niet meteen een eenduidige verklaring te geven.

TTC < 2,0s

Ook voor de TTC kleiner dan 2,0s zijn deze analyses uitgevoerd. Hierbij bleek dat er alle scenario's significant verschillen van de referentiesituatie. Op basis hiervan mag worden aangenomen dat het ADA-systeem daadwerkelijk bijdraagt aan een verbetering van de verkeersveiligheid.

Nr.	Scenario	Gemiddeld % TTC < 2,0s	SD (σ)	E(X-Y)	$2\sqrt{(\sigma X + \sigma Y)}$
1	0 %	3,61 %	$\pm 0,26$		
2	5% snelheid	2,38 %	$\pm 0,20$	1,23	$\pm 0,64$
3	5% volgafstand	2,78 %	$\pm 0,22$	0,83	$\pm 0,67$
4	20% snelheid	0,94 %	$\pm 0,12$	2,67	$\pm 0,56$
5	20% volgafstand	1,94 %	$\pm 0,17$	1,66	$\pm 0,62$
6	50% snelheid	0,32 %	$\pm 0,04$	3,29	$\pm 0,52$
7	50% volgafstand	1,13 %	$\pm 0,12$	2,48	$\pm 0,57$

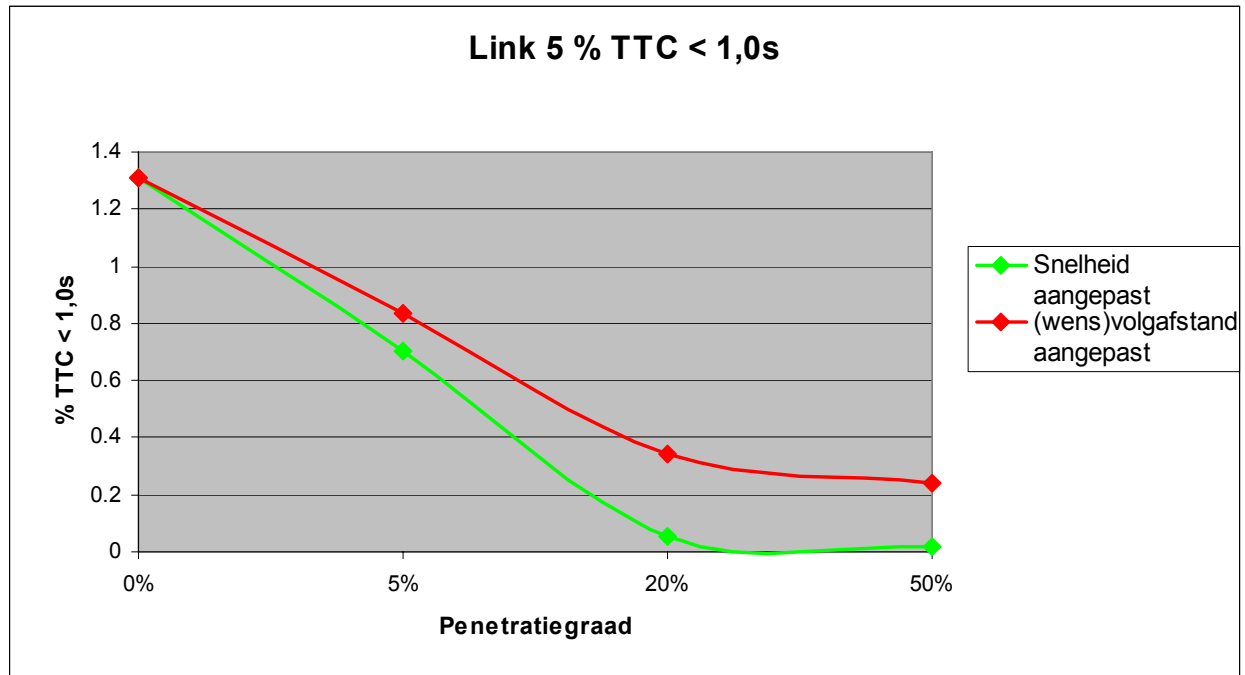
Tabel 2.3: Analyse significantie verschillende scenario's link 5, percentage TTC kleiner dan 2,0s. (minuut 2 t/m 9)

Als de scenario's onderling worden vergeleken op basis van de penetratiegraad maar met gelijke gedragsaanpassing dan blijkt dat ook de verschillen tussen scenario's significant van elkaar verschillen. Deze resultaten geven aan dat met een verhoging van de penetratiegraad de verkeersveiligheid alleen maar toeneemt. Een grote penetratiegraad leidt tot een verhoging van de verkeersveiligheid.

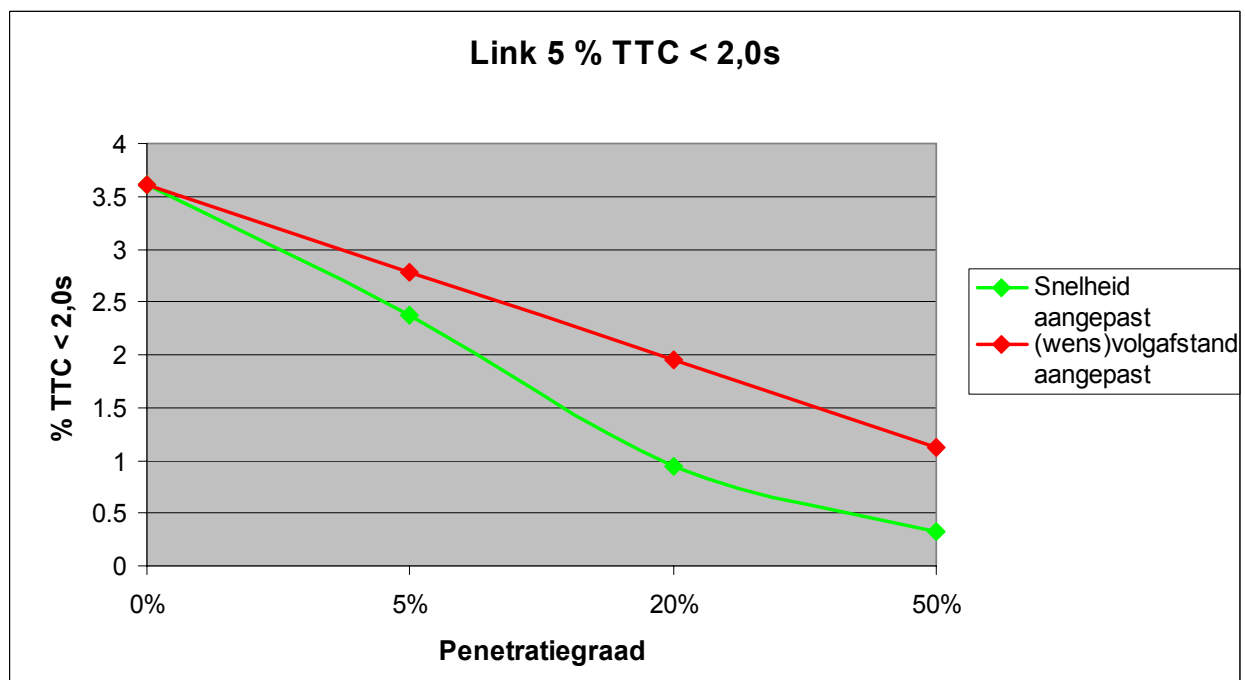
Nr.	Scenario	Gemiddeld % TTC < 2,0s	SD (σ)	E(X-Y)	$2\sqrt{(\sigma X + \sigma Y)}$
2	5% snelheid	2,38 %	$\pm 0,20$	0,40	$\pm 0,59$
3	5% volgafstand	2,78 %	$\pm 0,22$		
4	20% snelheid	0,94 %	$\pm 0,12$	1,01	$\pm 0,41$
5	20% volgafstand	1,94 %	$\pm 0,17$		
6	50% snelheid	0,32 %	$\pm 0,04$	0,81	$\pm 0,26$
7	50% volgafstand	1,13 %	$\pm 0,12$		

Tabel 2.4: Analyse t.b.v. aantonen significantie tussen verschillende scenario's met gelijke penetratiegraad, op basis van het percentage TTC kleiner dan 2,0s (minuut 2 t/m 9)

Als de beide gedragsaanpassingen met elkaar vergeleken worden dan blijkt dat met uitzondering van 5% penetratiegraad een aanpassing van de snelheid significant groter effect heeft dan een aanpassing van de (wens)volgafstand. Om het systeem het meest effectief te laten functioneren is het verstandig om bestuurders te adviseren om hun snelheid vroegtijdig aan te passen.



Grafische weergave resultaten, Link 5 Time To Collision kleiner dan 1,0s voor de minuten 2 t/m 9



Grafische weergave resultaten, Link 5 Time To Collision kleiner dan 2,0s voor de eerste minuut

Bijlage 6: Standaarddeviatie Snelheid link 5

Ook voor link 5 is geanalyseerd of er op basis van de standaarddeviatie significante verschillen bestaan tussen de referentiesituatie en de scenario's waarin het ADA-systeem actief is.

Op basis van de resultaten uit tabel 6.1 blijkt dat tussen de referentiesituatie en verschillende scenario's sprake is van een significant verschil. Echter opvallend hierbij is dat er bij een lage penetratiegraad sprake is van een toename in de standaarddeviatie van de snelheid. Dit in tegenstelling tot de situatie op link 7 waar steeds een afname te zien was van de standaarddeviatie van de snelheid. In de basissituatie zijn er voertuigen die op link 5 al starten met afremmen, doordat zij door andere voertuigen gedwongen worden (die voor de hazard afremmen). In het geval van een aanpassing van de snelheid is er al een klein percentage voertuigen dat vroegtijdig afremt voor de hazard terwijl andere voertuigen nog gewoon doorrijden met hun normale snelheid. Mogelijk wordt hierdoor de vergrote standaarddeviatie verklaard.

Scenario	Standaarddeviatie Snelheid	SD (σ)	$E(X-Y)$	$2\sqrt{(\sigma_X + \sigma_Y)}$
0 %	11,70	$\pm 0,58$		
5% snelheid	13,70	$\pm 0,37$	2,00	$\pm 1,38$
5% volgafstand	13,21	$\pm 0,44$	1,51	$\pm 1,47$
20% snelheid	12,91	$\pm 0,22$	1,21	$\pm 1,25$
20% volgafstand	14,04	$\pm 0,32$	2,34	$\pm 1,33$
50% snelheid	10,12	$\pm 0,17$	1,59	$\pm 1,21$
50% volgafstand	13,13	$\pm 0,26$	1,42	$\pm 1,27$

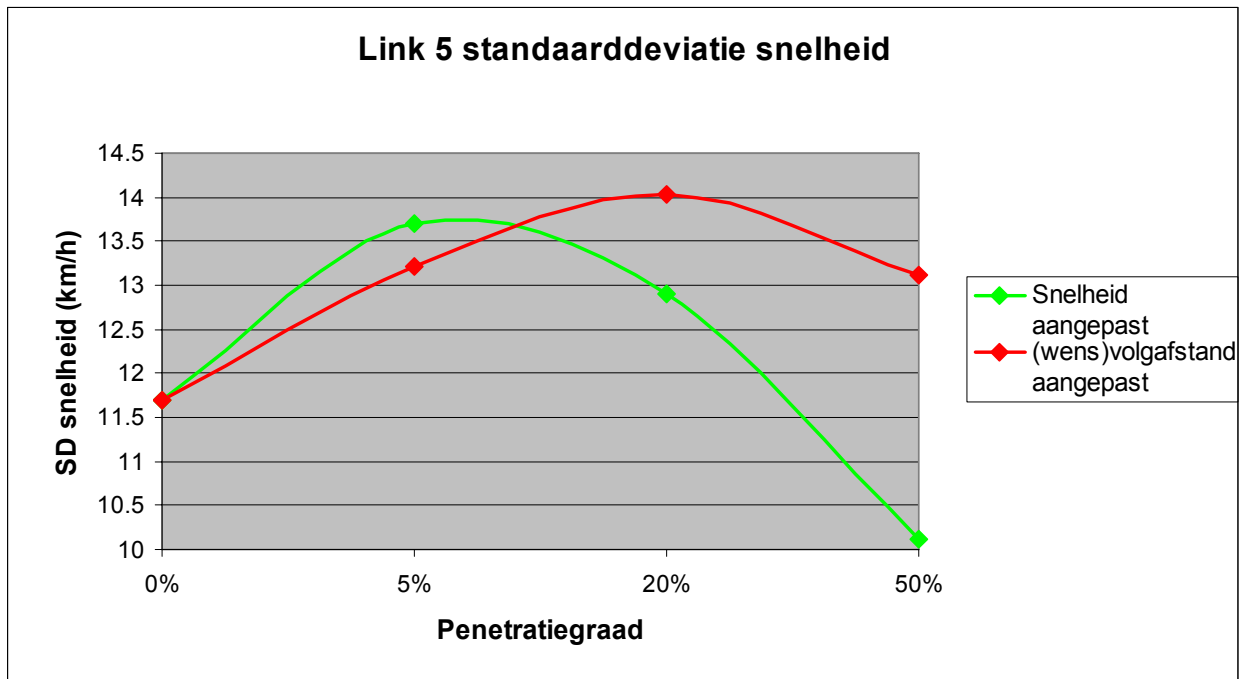
Tabel 6.1: Analyse significantie verschillende scenario's op basis van de standaarddeviatie van de snelheid op link 5 (minuut 2 t/m 9)

Als de scenario's onderling worden vergeleken op basis van de penetratiegraad maar met gelijke gedragsaanpassing dan blijkt dat alleen tussen hogere penetratiegraden (20% en 50%) sprake is van een significant verschil, zowel bij een aanpassing van de snelheid als bij de (wens)volgafstand. Op basis hiervan kan worden aangenomen dat een verhoging van de penetratiegraad leidt tot een verbetering van de verkeersveiligheid. Zeker in dit geval, waarbij er bij de kleine penetratiegraden sprake is van een toename van de standaarddeviatie van de snelheid.

Nr.	Scenario	Standaarddeviatie Snelheid	SD (σ)	$E(X-Y)$	$2\sqrt{(\sigma_X + \sigma_Y)}$
2	5% snelheid	13,70	$\pm 0,37$	0,49	$\pm 1,16$
3	5% volgafstand	13,21	$\pm 0,44$		
4	20% snelheid	12,91	$\pm 0,22$	1,13	$\pm 0,77$
5	20% volgafstand	14,04	$\pm 0,32$		
6	50% snelheid	10,12	$\pm 0,17$	3,01	$\pm 0,61$
7	50% volgafstand	13,13	$\pm 0,26$		

Tabel 6.2: Analyse t.b.v. aantonen significantie tussen verschillende scenario's met gelijke penetratiegraad, op basis van standaarddeviatie van de snelheid op link 5

Als de gedragsaanpassingen onderling worden vergeleken dan blijkt dat er bij een penetratiegraad van 5% geen sprake is van een significant verschil is tussen beide gedragsaanpassingen. Bij een hogere penetratiegraad is er wel sprake van een significant verschil. Aanpassing van de snelheid leidt al bij 20% tot een afname van de standaarddeviatie (in vergelijking met 5% scenario) terwijl bij een aanpassing van de (wens)volgafstand deze afname pas begint bij 50% penetratiegraad.



Grafische weergave resultaten, Link 5 Standaarddeviatie Snelheid minuut 2 t/m 9

Bijlage 7: Remvertraging $< -4,5\text{m/s}^2$ link 5

In tegenstelling tot de standaarddeviatie van de snelheid is er bij de remvertraging $< -4,5\text{m/s}^2$ geen sprake van een toename bij een lage penetratiegraad. De verschillen tussen de scenario's met het systeem en de referentiesituatie zijn allemaal significant, zie ook tabel 7.1. Het is dus opvallend dat ondanks een vergroting van de snelheidsverschillen er een afname is van het percentage sterke remvertragingen. In combinatie met de resultaten op de TTC mag worden aangenomen dat de toename van de standaarddeviatie geen negatieve invloed heeft op de verkeersveiligheid.

Scenario	Percentage remvertraging $< 4,5\text{m/s}^2$	SD (σ)	$E(X-Y)$	$2\sqrt{(\sigma X + \sigma Y)}$
0 %	16,37 %	$\pm 0,87$		
5% snelheid	12,46 %	$\pm 0,61$	3,90	$\pm 2,14$
5% volgafstand	14,74 %	$\pm 0,64$	1,63	$\pm 2,17$
20% snelheid	7,17 %	$\pm 0,38$	9,20	$\pm 1,91$
20% volgafstand	12,65 %	$\pm 0,51$	3,71	$\pm 2,03$
50% snelheid	4,82 %	$\pm 0,24$	11,55	$\pm 1,81$
50% volgafstand	10,80 %	$\pm 0,43$	5,57	$\pm 1,95$

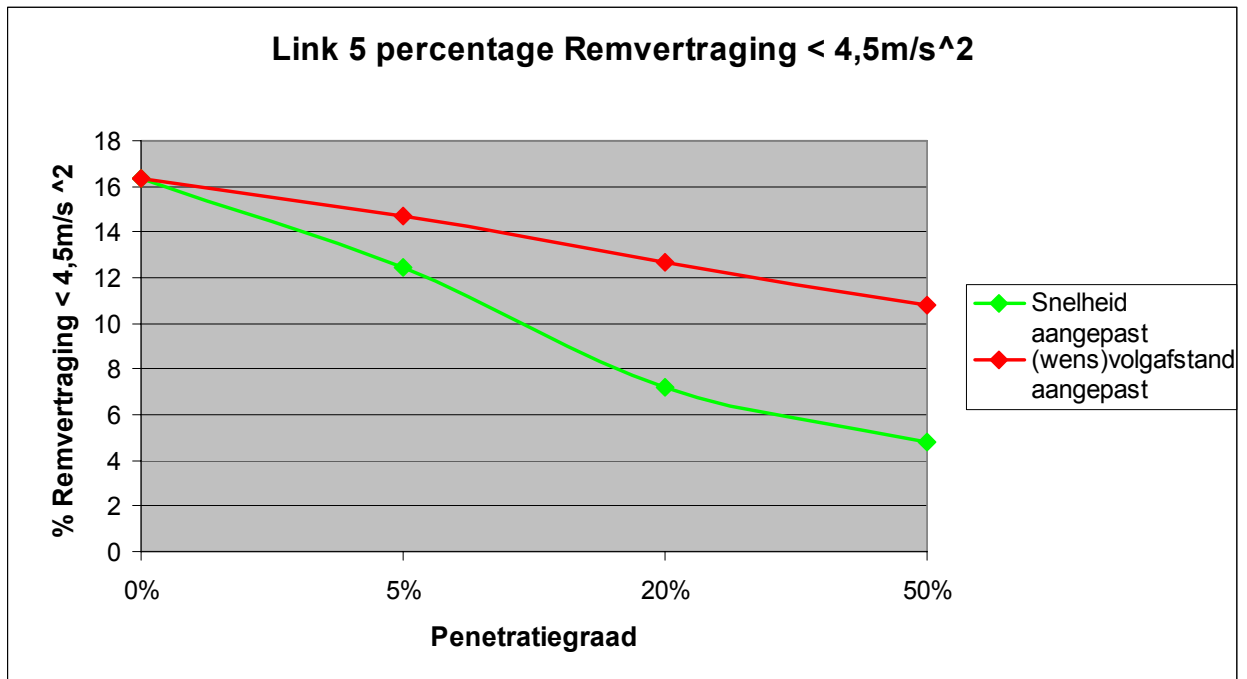
Tabel 7.1: Analyse significantie verschillende scenario's op basis van de remvertraging op link 5 (minuut 2 t/m 9)

Als de scenario's onderling worden vergeleken op basis van de penetratiegraad, maar met gelijkblijvende gedragsaanpassing dan blijkt dat al deze vergelijkingen significant van elkaar verschillen. Aangenomen mag worden dat door een verhoging van de penetratiegraad het systeem een groter positief effect heeft op de verkeersveiligheid, ongeacht welke gedragsaanpassing wordt geadviseerd aan de bestuurders.

Als laatste is ook voor de remvertraging onderzocht welke gedragsaanpassing het meeste effect heeft. Hieruit bleek zeer duidelijk dat een aanpassing van de snelheid een significant groter effect heeft dan een aanpassing van de (wens)volgafstand, zie ook tabel 7.2. Ook op basis van deze indicator kan geconcludeerd worden dat het beste aan de bestuurders geadviseerd kan worden dat zij vroegtijdig hun snelheid aanpassen.

Nr.	Scenario	Percentage remvertraging $< 4,5\text{m/s}^2$	SD (σ)	$E(X-Y)$	$2\sqrt{(\sigma X + \sigma Y)}$
2	5% snelheid	12,46	$\pm 0,61$	2,28	$\pm 1,77$
3	5% volgafstand	14,74	$\pm 0,64$		
4	20% snelheid	7,17	$\pm 0,38$	5,48	$\pm 1,28$
5	20% volgafstand	12,65	$\pm 0,51$		
6	50% snelheid	4,82	$\pm 0,24$	5,98	$\pm 0,97$
7	50% volgafstand	10,80	$\pm 0,43$		

Tabel 7.2: Analyse t.b.v. aantonen significantie tussen verschillende scenario's met gelijke penetratiegraad, op basis van standaarddeviatie van de snelheid



Grafische weergave resultaten, Link 5 Percentage remvertragingen kleiner dan $-4,5 \text{ m/s}^2$ minuut 2 t/m 9