Automotive Campus 30
5708 JZ Helmond
Postbus 756
5700 AT Helmond

www.tno.nl

T +31 88 866 57 29
F +31 88 866 88 62

TNO-rapport 2019 R10146



Datum	15 februari 2019
Auteur(s)	Gerdien Klunder, Michel Legius, Hettie Boonman, Ron Wouters, Simeon Calvert, Paco Hamers, Stefan Talen, Isabel Wilmink (internal review), Maurice Kwakkernaat (internal review) and Joke Welten (internal review).
Exemplaarnummer	1
Oplage	1
Aantal pagina's	93 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	7
Opdrachtgever	Provincie Noord-Holland
Projectnaam	CACC proef Noord-Holland
Projectnummer	060.32337

© 2019 TNO

Managementuittreksel

Titel :	CACC proef Noord-Holland
Auteur(s):	Gerdien Klunder, Michel Legius, Hettie Boonman, Ron Wouters, Simeon Calvert, Paco Hamers, Stefan Talen, Isabel Wilmink (internal review), Maurice Kwakkernaat (internal review) and Joke Welten (internal review).
Datum :	15 februari 2019
Opdrachtnr. :	1000067486
Rapportnr. :	TNO 2019 R10146

Ondertekening

Helmond, 15 februari 2019 TNO



Bastiaan Krosse
Afdelingshoofd



Gerdien Klunder
Auteur

Samenvatting

Alle trends en ontwikkelingen wijzen uit dat de groei van mobiliteit in Noord-Holland de komende jaren doorzet. Tegelijkertijd vinden er technologische ontwikkelingen plaats die de negatieve impact mogelijk kunnen beperken. De provincie Noord-Holland investeert in Smart Mobility ontwikkelingen met als doel een betere doorstroming en verkeersveiligheid op de weg. Onderdeel van deze investering is onderzoek van de provincie naar de ontwikkelingen van zelfrijdend verkeer en de interactie met de provinciale infrastructuur. Om nieuwe toepassingen daadwerkelijk in de praktijk tussen het verkeer uit te testen, heeft de provincie een proeftuin ingericht. Onderdeel van deze proeftuin is de N205, uitgerust met 6 intelligente verkeerslichten, waar toepassingen zijn te testen in verschillende omstandigheden, zoals verschillende snelheidslimieten, invoegstroken en interacties met langzaam verkeer. De provincie Noord-Holland en TNO zijn gezamenlijk tot een voorstel gekomen voor een onderzoek naar de effecten van ACC en CACC.

In de week van 3 t/m 7 september 2018 heeft TNO daarom in samenwerking met de provincie Noord-Holland op de N205 een praktijktest uitgevoerd over het rijden met ACC en CACC in pelotons. De uitkomsten van de praktijktest zijn gebruikt in een simulatiestudie om de potentie van deze systemen op het wegennet van de provincie Noord-Holland te kunnen bepalen.

De effecten van grootschalige invoering van Adaptive Cruise Control (ACC) en Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) op het onderliggende wegennet is onderzocht met behulp van een simulatiestudie op een gedeelte van de N205 en de N201 in de provincie Noord-Holland, en vergeleken met de huidige situatie met handmatig rijgedrag. Het rijgedrag van de voertuigen in de simulatie is gekalibreerd en gevalideerd (aangepast en gecontroleerd) aan de hand van metingen die in een praktijkproef zijn gedaan op de N205 en N201. Tenslotte zijn de effecten opgeschaald naar het gehele netwerk van de provincie Noord-Holland.

ACC is een comfortfunctie voor de bestuurder waarbij cruise control automatisch een ingestelde afstand houdt tot een voorganger. De minimale veilige volgtijd is typisch één seconde of hoger. ACC is momenteel een functie die op veel nieuwe voertuigen aanwezig is. CACC is een geavanceerder systeem, nog niet verkrijgbaar, dat bovenop de ACC functie in staat is om met voorliggende voertuig(en) te communiceren en daardoor veel sneller en beter op veranderingen van de snelheid van zijn voorganger(s) kan reageren en op een kortere veilige volgtijd kan rijden. Hierdoor kan het verkeer in potentie beter doorstromen, kunnen files worden voorkomen en kan het wellicht veiliger worden.

Bij de praktijktest is met pelotons van 3 en 7 voertuigen tussen regulier verkeer gereden. Uniek aan deze test is de implementatie van verregaande voertuigautomatisering tezamen met de communicatie tussen voertuigen en slimme verkeerslichten. Daarnaast is aangetoond dat de proef op veilige wijze gedurende een volle werkweek op de openbare weg tussen regulier verkeer kon worden uitgevoerd.
De gebruikte auto’s waren allemaal van hetzelfde merk en type (Toyota Prius). De proef was niet aangekondigd, waardoor het overige verkeer niet bij voorbaat al rekening hield met eventueel afwijkend gedrag van de voertuigen in het peloton.

De onderlinge volgafstand van de voertuigen in het peloton was 0,6 seconden plus een vaste volgafstand van 5 meter. Deze volgafstand is niet opvallend korter of langer dan de volgafstand die door regulier verkeer gehanteerd wordt. Het grote verschil is wel dat CACC op deze afstanden direct reageert op snelheidsverschillen van de voorligger. Daardoor hoeft er minder hard geremd te worden dan bij normale voertuigen en draagt dit sterk bij aan de veiligheid en het rijcomfort. Voor wat betreft volgafstand in stabiel verkeer vertoont het CACC peloton dan ook geen bijzonder opvallend gedrag ten opzichte van het reguliere verkeer.

De ervaring van de testrijders was dat het peloton van 3 of 7 voertuigen nauwelijks als zodanig werd opgemerkt tijdens de praktijkproef. Ook is gebleken dat andere bestuurders van personenwagens bij de gehanteerde volgafstanden nog zonder twijfel tussen het peloton van uitgeruste voertuigen durfden in te voegen (zowel bij 3 als 7 voertuigen). Het aanpassen aan deze invoeger door de CACC voertuigen gebeurde steeds op een vloeiende, comfortabele en onopvallende wijze. Voor een bestuurder die achter het peloton reed was dit niet of nauwelijks merkbaar en dit leidde dan ook niet tot acties als plotselinge remmingen of uitwijkmanoeuvres.

De resultaten van de ervaringen van de testrijders zijn eenduidig:
Handmatig rijden is gemiddeld het meest plezierig en voelt het meest natuurlijk. ACC voelt gemiddeld het minst plezierig. Het rijden met CACC wordt op alle aspecten prettiger gevonden dan rijden met ACC. Het verschil in rijplezier tussen zelfstandig rijden en rijden met CACC is niet significant.

Op basis van zowel de hierboven beschreven ervaring van de bestuurders van de auto's in het peloton als van de geanalyseerde camerabeelden, kan gezegd worden dat het rijden in pelotons tussen regulier verkeer niet lijkt te leiden tot afwijkend gedrag van andere weggebruikers of een ongewenste verandering van het verkeersbeeld in de nabijheid van het peloton.

De door TNO geïnstalleerde hard- en software om deze proef mogelijk te maken heeft zich gedurende de testweek robuust getoond en heeft steeds zo gefunctioneerd zoals bedoeld.

Tijdens de praktijktest zijn data vanuit de voertuigen gemeten en opgeslagen (snelheid, acceleratie, volgafstand, welk systeem actief was etc.). Deze data zijn achteraf geanalyseerd en gebruikt voor de simulaties, om ACC en CACC zo realistisch mogelijk te modelleren.

Om de effecten van grootschalige invoering van ACC en CACC op het onderliggende wegennet te onderzoeken, zijn simulaties uitgevoerd op een gedeelte van de N205 en de N201. Het rijgedrag van de voertuigen in de simulatie is gekalibreerd en gevalideerd op basis van de data van de praktijktest. De simulatie betreft een microsimulatie. Dit betekent dat er individuele voertuigen met individueel rijgedrag zijn gesimuleerd. De simulatie is uitgevoerd met het softwaremodel Vissim, aangevuld met een nieuw voertuigtype met ACC/CACC. Dit nieuwe voertuigtype vertoont identiek gedrag als de praktijktestvoertuigen. Ook de intelligente verkeerslichten zijn in de simulatie opgenomen, identiek aan de verkeerslichtregelingen op de weg.

Er zijn twee verschillende verkeersdrukteniveaus gesimuleerd, namelijk een ochtendspits en een rustige periode. Voor beide drukteniveaus zijn verschillende

scenario's met verschillende percentages van ACC en CACC-voertuigen gesimuleerd, namelijk 0%, 10%, 50% en 100% ACC of CACC. Daarnaast zijn nog twee systemen toegevoegd waarbij communicatie plaatsvindt met slimme verkeerslichten (iVRI's), wat de doorstroming nog meer kan verbeteren:

- Groenherkenning: als een voertuig het eerste wachtende voertuig is bij rood licht, krijgt het informatie over de tijd tot groen. Dit verkort zijn reactietijd bij het optrekken zodra het licht op groen gaat.
- Groenverlenging: de groentijd op de doorgaande richting van de kruising (met iVRI's) wordt verlengd indien er een peloton van CACC-voertuigen wordt gedetecteerd dat richting de kruising rijdt, zodat het gehele peloton door dezelfde groenfase kan rijden (pelotonkoppeling).

De doorstroming is bekeken aan de hand van reistijden (van alle voertuigen) over de kruisingen heen en aan de hand van voertuigtellingen na elk kruispunt. Bij een weg met kruispunten is de capaciteit van de kruispunten doorgaans maatgevend voor de totale capaciteit. Uit de analyse van de reistijden blijkt dat het scenario waarin alle voertuigen zijn uitgerust met CACC een behoorlijke reistijdwinst oplevert in druk verkeer. Als er groenverlenging wordt toegepast is de winst nog groter: gemiddeld 11% afname met groenverlenging en 5% afname zonder groenverlenging. Op de kruising waar het effect het grootst is, is er een afname van 39% van de gemiddelde reistijd. Bij de kruisende richtingen neemt de reistijd toe, omdat vanwege de groenverlenging de kruisende richtingen meer rood krijgen. Maar omdat er minder verkeer is op de kruisende richtingen, is het totale effect bij 100% CACC toch positief.

Als er alleen gereden wordt met ACC, zien we juist een grote toename van de reistijden. Ook is het aantal voertuigen dat door een groenfase passeert met ACC kleiner dan bij handmatig bestuurde voertuigen of voertuigen met CACC. De capaciteit neemt dus af.
Redenen voor de minder goede resultaten met ACC zijn:

- ACC reageert trager en trekt daardoor later en langzamer op dan normale voertuigen;
- De reactie van ACC op snelheidsveranderingen van voorgangers heeft een grotere tijdsvertraging dan normale voertuigen;
- Bij invoegingen voor/van een ACC-voertuig treden sterke rematies op als ACC is ingeschakeld. Bestuurders zullen in de praktijk de controle overnemen in deze situaties en daarom wordt ACC in deze situaties in de simulaties uitgeschakeld. Echter, dit gedrag leidt tot onrustig rijgedrag wat ook tot verstoringen kan leiden.

Als er minder voertuigen zijn uitgerust met CACC (50% of minder) zien we het positieve effect op de reistijd niet. De belangrijkste oorzaak hiervoor is dat een deel van de CACC-voertuigen teruggeschakeld zijn naar ACC doordat ze geen voertuig met CACC voor zich hebben, dit heeft een negatief effect. Ook wordt CACC soms uitgeschakeld door de bestuurder, zodat het werkelijke percentage actieve CACC systemen veel lager ligt dan 50%.
Bij 10% CACC is er vrijwel geen effect. Er zijn dan bijna geen pelotons, zodat er voornamelijk met ACC wordt gereden. Het aandeel van deze voertuigen is echter zo klein dat er bijna geen (negatief) effect is, dat wel zichtbaar is bij hogere penetratiegraden van ACC.

Bij CACC op rechte stukken met slechts 1 strook richting een kruising met voorsorteerstroken neemt de capaciteit af ten opzichte van handmatig rijden. De

belangrijkste reden hiervoor is de grotere afstand tussen voertuigen bij stilstaan ten opzichte van normale voertuigen, waardoor de toegang tot andere voorsorteerstroken wordt geblokkeerd. Deze afstand is tijdens de test, met prototype software, toegevoegd i.v.m. veiligheid. In de toekomst zal CACC gebruikt kunnen worden met veel kortere volgafstanden, waardoor dit negatieve effect zal verdwijnen. Het CACC systeem zal hiervoor nog doorontwikkeld moeten worden.

Als we kijken naar de maximale hoeveelheid voertuigen die enkele honderden meters na de kruising passeert, zien we bij het drukste kruispunt hetzelfde beeld als hierboven beschreven: bij 100% CACC is het aantal passerende voertuigen groter dan in de huidige situatie. Bij alle andere scenario's zijn de verschillen t.o.v. het referentiescenario klein. Bij de minder drukke kruispunten heeft CACC geen effect op de maximale capaciteit, omdat al het verkeer al door het groene licht kon passeren.
Ook als we kijken naar het aantal voertuigen dat per minuut groentijd een verkeerslicht passeert, zien we dat dit aantal het grootst is bij 100% CACC met groenverlenging, en het kleinst bij 100% ACC.

CACC presteert het beste als er zo lang mogelijke 'treintjes' (pelotons) van opeenvolgende CACC-voertuigen kunnen rijden. Invoegstroken en kruisingen zouden kunnen zorgen voor het opbreken van deze pelotons. Daarom is in de simulaties ook onderzocht hoe de lengte en het aantal pelotons verandert bij kruisingen en invoegingen. Bij kruisingen worden pelotons gevormd; na een kruising zijn er meer en langere pelotons. Dat kan verklaard worden doordat tijdens het wachten de pelotons worden samengevoegd. Dit effect zien we ook als er een rijstrook af gaat van twee naar één rijstrook, maar niet als er een rijstrook afgaat van drie naar twee rijstroken. Dit zou verklaard kunnen worden uit het feit dat het verkeer bij drie rijstroken meer mogelijkheden heeft om een invoeging op te vangen, bijvoorbeeld door van de middelste rijstrook naar de rechter rijstrook te wisselen. In dat geval neemt de lengte van pelotons juist af.

Redenen voor verbetering van de doorstroming door CACC zijn:
- CACC-voertuigen reageren sneller en trekken daardoor sneller op dan ACC- en dan gewone voertuigen, zodat er meer voertuigen door een groenfase kunnen.
- CACC-voertuigen reageren sneller en minder heftig op snelheidsverschillen van de voorligger, waardoor er minder instabiliteiten optreden die tot filevorming kunnen leiden (zoals bij filegolven op de snelweg).

Echter, in sommige gevallen lieten de simulaties met CACC geen verbetering zien ten opzichte van de referentie, zoals ook boven aangegeven. Redenen voor langere reistijden bij CACC zijn:
- Om in een peloton te kunnen blijven rijden, worden iets lagere snelheden dan de snelheid die de bestuurder normaal gesproken zou willen rijden geaccepteerd, tot 5% onder de wenssnelheid, zodat je niet gaat inhalen.
- De afstand tussen voertuigen bij stilstaan is groter. Hierdoor worden soms bij een gelijk aantal voertuigen de voorsorteerstroken voor andere richtingen eerder geblokkeerd.
- De volgtijd voor CACC was in deze praktijktest en simulatiestudie maar beperkt kleiner dan van normale voertuigen. Bovenop een ingestelde volgtijd van 0,6 seconden komt ook een vaste veiligheidsafstand van zo'n 5 meter, waardoor de volgafstand bij de gesimuleerde snelheden gemiddeld 0,9 seconden is. De volgafstand van de manuele bestuurders is rond de 1,5 seconden.

Er is op basis van de simulatieresultaten ook een inschatting gemaakt van het effect op de verkeersveiligheid van CACC en ACC. Het blijkt dat er zowel bij CACC als ACC vaker sterke remacties optreden bij abrupte invoegingen vlak voor de uitgeruste voertuigen. Dit komt doordat bij invoegingen CACC terugschakelt naar ACC om zo snel mogelijk op een veilige volgafstand te komen. Een normale bestuurder zal voor een langere tijd een hoger veiligheidsrisico accepteren en daarom minder heftig remmen. In de simulaties komen geen echt kritische situaties voor, zodat de verkeersveiligheid met CACC voldoende geacht wordt. De veiligheid kan verder verhoogd worden door grotere remacties toe te staan bij het CACC systeem. De bestuurder hoeft dan minder vaak in te grijpen, waardoor nog minder potentieel gevaarlijke situaties zullen voorkomen.

De resultaten van de simulaties zijn opgeschaald naar de hele provincie Noord-Holland, door de effecten in te delen naar kruispunttype en deze toe te passen op alle relevante kruisingen in de provincie. Dit leidt naar schatting tot een afname van 12% van alle voertuigverliesuren op een gemiddelde werkdag bij 100% CACC met groenverlenging, ten opzichte van de normale situatie met alleen handmatig rijden zonder systemen. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat er bij deze inschatting veel aannames gedaan moesten worden vanwege de beperkte beschikbare informatie over de kruisingen en dat deze niet altijd vergelijkbaar zijn met de kruisingen uit de simulatie.

Om de potentie van CACC voor de doorstroming verder te verhogen, kan onderzocht worden of het haalbaar is om met kortere volgafstanden te rijden en ook bij stilstand een kortere afstand tot de voorligger aan te houden, zodat wachtrijen korter zullen zijn en voorsorteerstroken niet geblokkeerd worden.

Inhoudsopgave

Managementuittreksel **2**

Samenvatting **3**

1 Inleiding **9**
1.1 De praktijktest en simulatiestudie 10
1.2 Leeswijzer 11

2 De resultaten van de praktijktest **12**
2.1 Uitgangspunten praktijktest 12
2.2 Onderzoek naar proefbeleving testrijders 14

3 De resultaten van de simulatiestudie **16**
3.1 Uitgangspunten simulatiestudie 16
3.2 De doorstroming op kruispunten 17
3.3 Het opsplitsen van pelotons 24
3.4 De verkeersveiligheid 25
3.5 Conclusies 28

4 Opschaling **30**
4.1 Methode voor opschaling 30
4.2 Resultaten van de opschaling 30

5 Conclusies en aanbevelingen **32**
5.1 Conclusies 32
5.2 Aanbevelingen en vervolgonderzoek 33

Appendix A: De CACC praktijktest **36**

Appendix B: Opzet bestuurdersonderzoek **41**

Appendix C: Opzet simulatiestudie **45**

Appendix D: Kalibratie met meetdata uit praktijktest **60**

Appendix E: Additionele figuren bij resultaten **74**

Appendix F: Opschalingsmethode en lijst met geselecteerde kruispunten voor de opschaling **89**

Appendix G: Referenties **93**

1 Inleiding

Alle trends en ontwikkelingen wijzen uit dat de groei van mobiliteit in Noord-Holland de komende jaren doorzet[1]. Tegelijkertijd vinden er technologische ontwikkelingen plaats die de negatieve impact mogelijk kunnen beperken. De provincie Noord-Holland investeert in Smart Mobility ontwikkelingen met als doel een betere doorstroming en verkeersveiligheid op weg en water. De verbeterde doorstroming en verkeersveiligheid moet bijdragen aan een betere bereikbaarheid van de regio en betere leefbaarheid voor de omgeving.

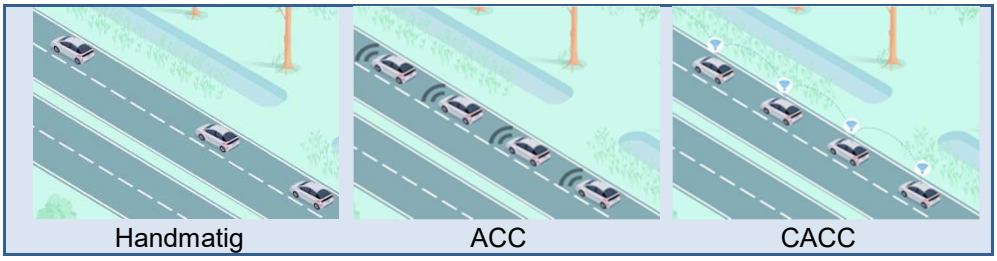
Onderdeel van deze investering is het onderzoek van de provincie naar de ontwikkelingen van zelfrijdend verkeer en de interactie met de provinciale infrastructuur. Om nieuwe toepassingen daadwerkelijk in de praktijk tussen het verkeer uit te testen, heeft de provincie een proeftuin ingericht op de provinciale wegen rond Schiphol. Onderdeel van deze proeftuin is de N205, uitgerust met 6 slimme kruispunten (iVRI's), waar toepassingen zijn te testen in verschillende omstandigheden, zoals verschillende snelheidslimieten, invoegstroken en interacties met langzaam verkeer.

De provincie Noord-Holland en TNO zijn gezamenlijk tot een voorstel gekomen voor een onderzoek, inclusief een praktijktest en simulatiestudie, op de N205 met de automatisch rijdende systemen Adaptive Cruise Control (ACC) en Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC). De hypothese is dat *coöperatief* automatisch rijden (CACC) een aantal voordelen biedt ten opzichte van *rijden met* ACC en handmatig rijden zonder systemen. De potentiele voordelen zijn:

- Rustiger verkeersbeeld; gelijkmatiger optrekken en remmen ter hoogte van een peloton CACC-voertuigen, al dan niet gemengd met normaal verkeer.
- Betere doorstroming door beter anticiperend gedrag en kortere volgtijden.
- Verbeterde verkeersveiligheid bij afremmen en optrekken van een peloton CACC-voertuigen

In dit rapport worden de termen **handmatig rijden, ACC en CACC** gebruikt. **Handmatig rijden** houdt in dat de bestuurder continu zelf de snelheid, versnelling en richting bepaalt. Hierbij regelt de bestuurder de volgafstand tot de voorganger. **Adaptive Cruise Control** of ACC is een uitbreiding op Cruise Control, reeds commercieel beschikbaar, waarbij de auto met behulp van bijvoorbeeld radar of camera systemen de afstand meet tot de voorganger en constant houdt. Hierbij regelt het voertuig de bijbehorende snelheid en versnelling. Zonder voorganger (binnen een range van 150 tot 200 meter) is ACC vergelijkbaar met Cruise Control. **Cooperative Adaptive Cruise Control** of CACC is een uitbreiding op ACC waarbij het voertuig niet alleen meet, maar ook communiceert met andere voertuigen of bijvoorbeeld intelligente verkeerslichten. Dit maakt het mogelijk om sneller te reageren op veranderende snelheden of rekening te houden met de 'tijd-tot-groen'. CACC vereist een voorganger met CACC. Zonder een met CACC uitgeruste voorganger is het systeem werkzaam als ACC en zonder voorganger is het vergelijkbaar met normale Cruise Control

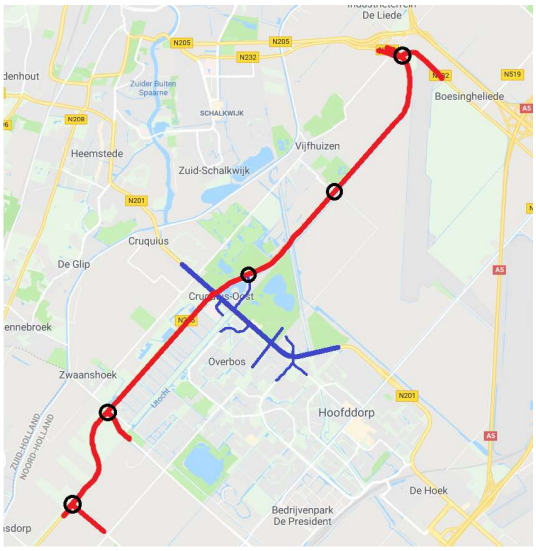
[1] Royal Haskoning DHV, MUST. (2017). Ontwikkelingsbeeld Mobiliteit 2050 Provincie Noord-Holland. Eindrapport in opdracht van de provincie Noord-Holland in het kader van de Omgevingsvisie.



1.1 De praktijktest en simulatiestudie

De provincie Noord-Holland heeft een proeftuin ingericht op de provinciale wegen rond Schiphol om nieuwe toepassingen uit te proberen in praktijk. Onderdeel van deze proeftuin is de N205. In het kader van de simulatiestudie is ook een deel van de N201 in de studie opgenomen (Figuur 1.1).

TNO bezit de kennis en techniek voor deze studie en heeft het onderzoek uitgevoerd voor de provincie Noord-Holland op infrastructuur, die ter beschikking is gesteld door de provincie.



Figuur 1.1 De N205 en het traject waarop de praktijktest heeft plaatsgevonden (rood). Voor de simulatiestudie is ook een deel van de N201 opgenomen (blauw). De vijf zwarte cirkels geven de intelligente kruispunten weer.

Op de N205 zijn vijf kruispunten uitgerust met intelligente verkeerslichten, afgekort als iVRI's. Dit zijn verkeerslichten die digitaal informatie kunnen uitzenden over bijvoorbeeld de huidige kleur of de tijd tot groen. Ook kunnen ze digitaal informatie ontvangen zoals een prioriteitsverzoek van bijvoorbeeld hulpdiensten.

In de CACC-praktijktest is getest met twee soorten communicatie met de verkeerslichten:

1. Een aanvraag voor groenverlenging voor pelotons van CACC-voertuigen, zodat een peloton in zijn geheel door dezelfde groenfase kan;
2. Informatie over de tijd tot groen (groenherkenning) in het voertuig, zodat het eerste voertuig bij het verkeerslicht sneller kan wegrijden zodra het licht op groen gaat.



Groenherkenning



Groenverlenging

In de simulatiestudie worden de inzichten van de praktijktest gebruikt om te kijken naar de effecten van grootschalige implementatie waarbij 0%, 10%, 50% of 100% van alle voertuigen over CACC beschikt.

1.2 **Leeswijzer**

Dit rapport bestaat uit vijf hoofdstukken. **Hoofdstuk 1** is de inleiding waar het onderzoek is geïntroduceerd en beschreven. **Hoofdstuk 2** beschrijft de opzet en de resultaten van de praktijktest. **Hoofdstuk 3** beschrijft de simulatiestudie waarbij de resultaten van de praktijktest zijn gebruikt om de effecten op doorstroming en verkeersveiligheid te bepalen. **Hoofdstuk 4** beschrijft de simulatiestudie waarbij het effect, gevonden op de N205 wordt opgeschaald naar een scenario voor de hele provincie Noord-Holland. **Hoofdstuk 5** gaat over de conclusies op basis van het onderzoek en de aanbevelingen voor de provincie Noord-Holland.

2 De resultaten van de praktijktest

In de week van 3 t/m 7 september 2018 heeft TNO op de N205 een praktijktest uitgevoerd. In deze praktijktest hebben voertuigen met ‘automatisch rijden’ functies in pelotons tussen regulier verkeer gereden. Dit hoofdstuk beschrijft de praktijktest en opgedane ervaring (2.1) samen met de belangrijkste resultaten op basis van de ervaringen van bestuurders (2.2 en B.2) en een uitgebreide analyse van de camerabeelden.

2.1 Uitgangspunten praktijktest

De praktijktest is uitgevoerd door met pelotons van 3 en 7 voertuigen (Toyota Prius) onaangekondigd tussen regulier verkeer te rijden. Tijdens de praktijktest trok het peloton weinig tot geen aandacht van het overige verkeer waardoor de verzamelde data een representatief verkeersbeeld bevatten.

De voertuigen zijn allemaal uitgerust met ACC en het door TNO ontwikkelde CACC systeem. Door het CACC systeem zijn de voertuigen niet alleen in staat om onderling te communiceren, maar ook met intelligente verkeerslichten op de N205 (Figuur 2.1). Dit maakt het mogelijk om, in vergelijking met ACC, veilig dichter op elkaar te rijden en efficiënter te rijden door rekening te houden met de tijd-tot-groen of als peloton een verzoek tot groenverlening te versturen.



Figuur 2.1, Communicatie tussen testvoertuigen en intelligente verkeerslichten

In de praktijktest zijn 4 soorten testen uitgevoerd in pelotons van zowel 3 als 7 voertuigen:

- In alle voertuigen wordt handmatig gereden
- In alle voertuigen wordt met Adaptive Cruise Control gereden
- In alle voertuigen wordt met Cooperative Adaptive Cruice Control gereden
- In alle voertuigen wordt met Cooperative Adaptive Cruise Control gereden in combinatie met Groenherkenning en groenverlenging.

2.1.1 Volgafstand tussen voertuigen

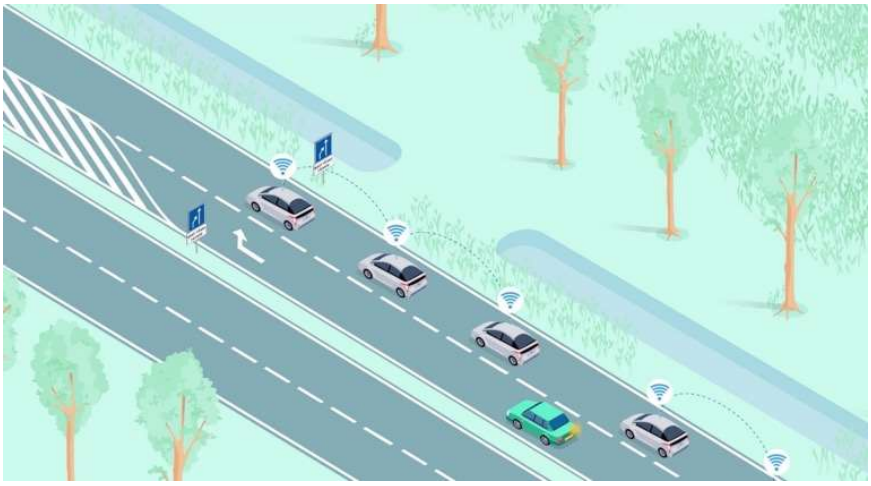
Tijdens de praktijktest reden de voertuigen in een peloton met CACC op een vaste volgafstand van elkaar. De volgafstand bestaat uit 5 meter plus de gereden afstand in 0,6 seconden. Bij een snelheid van 100 km/h legt een voertuig in 0,6 seconden circa 17 meter af. De volgafstand tussen in het peloton bij deze snelheid is dus ruim 22 meter, vergelijkbaar met een volgtijd van circa 0.8s. Deze afstand is niet opvallend korter of langer dan de volgafstand die door regulier verkeer gehanteerd wordt op deze weg. Het grote verschil is dat CACC direct reageert op snelheidsverschillen van de voorligger in tegenstelling tot de gemiddelde bestuurder.

2.1.2 De bestuurders

Alle bestuurders van de CACC voertuigen zijn CACC-ontwikkelaars, werkzaam bij TNO en hebben allen een rijtraining gevolgd, zoals ook vereist was in de ontheffing voor deze praktijktest. Hierdoor zijn de bestuurders bekend met de ontwikkelde systemen en testscenario's. De volgorde van bestuurders in het peloton was gedeeltelijk vooraf opgesteld. De testleider bevond zich bijvoorbeeld gedurende de gehele week op de laatste positie in het peloton, die het beste overzicht geeft. Ook de overige bestuurders hadden om praktische- en veiligheidsredenen een vaste positie in het peloton. Hierdoor waren de bestuurders geen representatieve groep testpersonen.

2.1.3 Verbreken van pelotons

Pelotons konden tijdens de praktijktest worden verbroken door een invoegend voertuig. Er is voor gekozen om de pelotons, na het aanvangen van de testrit op de N205, niet meer actief bij elkaar te brengen en enkel gebruik te maken van de rechter rijstrook. De pelotons konden wel weer bij elkaar komen doordat het voorste deel van het peloton stond te wachten voor een verkeerslicht of opgehouden werd door een langzamere verkeersdeelnemer.



Figuur 2.2, Invoegend verkeer tussen peloton CACC testvoertuigen

2.1.4 Veiligheid

De verkeersveiligheid had tijdens de praktijktest de hoogste prioriteit. Zo kreeg ieder voertuig voorafgaand aan iedere testsessie een functionele controle van alle systemen. Ook waren de bestuurders getraind om in te grijpen bij onvoorziene omstandigheden in de auto en in het verkeer.Tenslotte was er voor signaalverlies van één van de benodigde CACC signalen (radar, camera of Wi-Fi-verbinding) een akoestische waarschuwingsfunctie met bijbehorende aanduiding op het dashboard aanwezig. Het CACC systeem schakelt bij signaalverlies automatisch over op ACC.

2.2 **Onderzoek naar proefbeleving testrijders**

De praktijktest is gebruikt om data te verzamelen voor de simulatiestudies in hoofdstukken 3 en 4 en om de volgende twee hypotheses met betrekking tot de bestuurderservaring te toetsen:

- Het *rijden met* ACC als prettiger wordt ervaren dan *handmatig* rijden.
- Het *coöperatief automatisch* rijden met CACC als prettiger wordt ervaren dan handmatig rijden.

Iedere testrijder is gevraagd om na iedere test een vragenlijst in te vullen met betrekking tot het algemene beeld van de rit. Hierbij werd onderscheid gemaakt tussen de ritten waarin handmatig, met ACC of met CACC gereden werd. Er is gekozen voor een korte en snel in te vullen enquête, met vier stellingen, waarbij de bestuurder voor iedere stelling aangeeft in hoeverre deze van toepassing was op de net afgelegde rit. De opzet van dit onderzoek is te vinden in Appendix B.

Overkoepelend zijn de resultaten van alle bestuurderservaring eenduidig:

- Handmatig rijden is gemiddeld het meest plezierig en voelt het meest natuurlijk.
- ACC voelt gemiddeld het minst plezierig, het voelt als een proef en er moet relatief vaak worden ingegrepen door de bestuurder.
- Het rijden met CACC wordt op alle aspecten prettiger gevonden dan rijden met ACC. Het verschil in rijplezier tussen zelfstandig rijden en rijden met CACC is niet significant.

2.2.1 Verdere observaties tijdens de praktijktest

Aan de hand van analyse van de data en camerabeelden zijn nog een aantal interessante observaties gedaan. Deze observaties worden in deze paragraaf toegelicht en gaan over het verschil in reactietijd, de communicatie met intelligente verkeerslichten en andere weggebruikers, invoegen in het peloton en groenverlenging.

Reactietijd en communicatie

Tijdens de praktijktest waarbij het peloton met ACC reed werd het verschil in reactietijd tussen het ACC en CACC systeem goed zichtbaar. Reageren op een actie van je voorganger kost meer tijd dan het automatisch versnellen en vertragen via WiFi. Hierdoor reageren voertuigen trager en wordt er krachtiger afgeremd of opgetrokken om de afstand tot de voorganger constant te houden. Deze reactie versterkt naarmate het peloton langer wordt waardoor er een harmonica effect ontstaat. Tijdens het rijden met CACC was dit effect er niet.

De CACC voertuigen waren tijdens de praktijktest in staat om te communiceren met de intelligente verkeerslichten. De communicatie biedt de mogelijkheid om bijvoorbeeld de groenlicht-periode te verlengen om het gehele peloton te laten passeren; groenverlenging. Ook kan het kruispunt naar het voertuig communiceren hoe lang de ‘tijd-tot-groen’ en ‘tijd-tot-rood’ is zodat de individuele bestuurders een keuze kunnen maken om bijvoorbeeld snelheid te minderen. De groenvelenging heeft tijdens de praktijkproef naar behoren gefunctioneerd en heeft in alle gevallen het peloton als een geheel het verkeerslicht laten passeren.

Invoegen in het peloton

Overige verkeerdeelnemers voegden in tussen het peloton tijdens de praktijktest. Door invoegende voertuigen wordt het CACC peloton opgesplitst omdat ten minste één van de CACC voertuigen een voorligger detecteert die niet over CACC beschikt. Dit was één van de scenario’s waar het systeem op was berekend. Het CACC voertuig dat zijn CACC-voorligger verliest past zicht vloeiend, comfortabel en onopvallend aan door over te schakelen op ACC en de volgafstand te vergroten. Invoegende voertuigen hebben tijdens de praktijktest niet tot plotseling remmen of uitwijkmanoeuvres geleid en de test werd moeiteloos vervolgd met meerdere pelotons. Een peloton grootte van zeven voertuigen trekt meer aandacht dan een peloton van drie voertuigen maar zorgt niet voor merkbaar ander rijgedrag van andere weggebruikers.

3 De resultaten van de simulatiestudie

In een simulatiestudie zijn de metingen uit de praktijktest gebruikt om een model te maken dat de werkelijkheid nabootst. Door in een model de praktijktest na te bouwen ontstaat de mogelijkheid om het gedrag en het effect toe te passen op een groter deel van het verkeer. Op basis van de simulatie is dan in te schatten welk effect er wordt bereikt wanneer bijvoorbeeld 10%, 50% of zelfs 100% van de voertuigen over deze systemen beschikt. Het doel van de studie is dan ook om de impact te bepalen bij een toenemend gebruik van ACC en CACC systemen op de wegen in de provincie Noord-Holland, waarbij er meer slimme kruispunten zijn die kunnen communiceren met voertuigen.

In de simulatiestudie worden hypotheses getoetst met betrekking tot:

- De doorstroming op kruispunten
- Het opsplitsen van pelotons
- De verkeersveiligheid

Dit hoofdstuk bespreekt een beknopte opzet en de belangrijkste resultaten en bevindingen uit de simulatiestudie. Meer detail over de opzet, alle hypotheses, het model, de scenario's en resultaten is te vinden in appendix B. In appendix C staat beschreven hoe de resultaten van de proef met 7 voertuigen op de N205 zijn gebruikt bij het opzetten van het simulatie model.

3.1 **Uitgangspunten simulatiestudie**

De simulatie betreft een microsimulatie. Dit betekent dat er individuele voertuigen met individueel rijgedrag worden gesimuleerd. Dit zorgt voor gedetailleerde resultaten. De simulatie is uitgevoerd met een softwaremodel genaamd Vissim. Deze software is aangevuld met een nieuw voertuigtype, ontwikkeld door TNO. Dit nieuwe voertuigtype vertoont vergelijkbaar gedrag als de praktijktestvoertuigen bij het gebruik van ACC en CACC. Naast personenauto's bevat het model ook vrachtverkeer. Ook de intelligente verkeerslichten zijn in de simulatie opgenomen en zijn identiek aan de verkeerslichten op straat met de toevoeging van de groenverlenging. Deze groenverlenging detecteert alleen CACC pelotons van tenminste 5 voertuigen en verlengt vervolgens indien mogelijk de groenfase totdat de voertuigen de stopstreep zijn gepasseerd. Deze werkwijze is vergelijkbaar met de praktijktest.

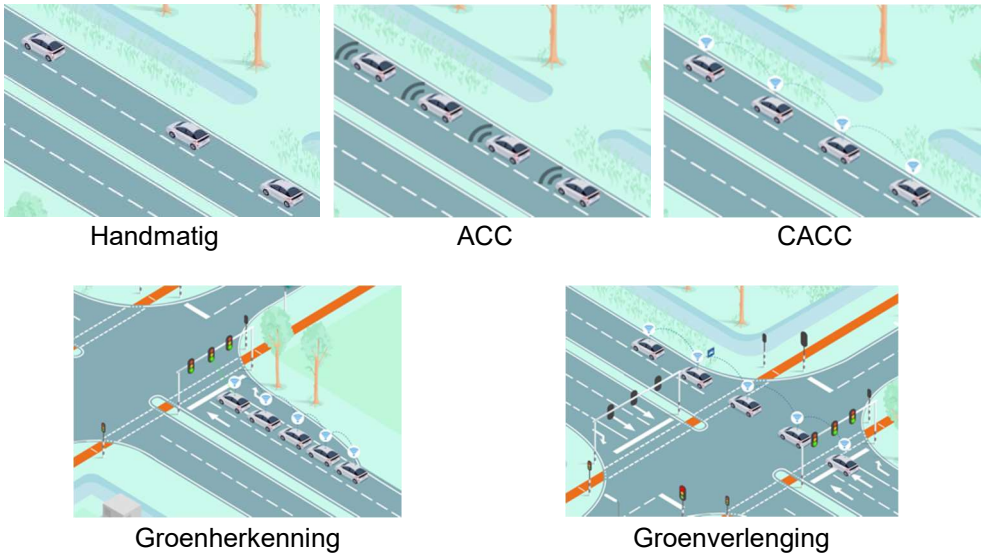
In het geval dat er kort voor een voertuig uit het peloton wordt ingevoegd schakelt het ACC en CACC systeem in de simulaties over naar handmatig rijden. In de praktijktest leverde het invoegen geen problemen op, maar in de simulaties komt het invoegen vaker voor en ook op kleinere volgafstanden, waardoor het meer gevolgen heeft dan in de praktijktest op de weg.

Er zijn in de simulatiestudie op hoofdlijnen vijf verschillende scenario's gemodelleerd (zie Figuur 3.1):

- Referentiesituatie waarin alleen handmatig gereden wordt;

- Referentiesituatie met groenherkenning waarin handmatig gereden wordt maar de reactietijd bij het optrekken bij kruispunten lager is, vanwege informatie over de tijd tot groen voor het eerste voertuig;
- ACC met groenherkenning
- CACC met groenherkenning
- CACC met groenherkenning en groenverlenging, waarbij de groenperiode wordt verlengd om het peloton in zijn geheel te laten passeren.

Deze scenario's zijn gesimuleerd in verschillende condities waarbij de penetratiegraad (het percentage van de voertuigen dat is uitgerust met ACC of CACC) en drukte op de weg is gevarieerd. Op basis hiervan zijn in totaal 22 scenario's bepaald. Een uitgebreidere toelichting op de scenario's is te vinden in Appendix B.



Figuur 3.1: Visualisatie van de verschillende systemen die gemodelleerd zijn in de simulatiestudie

3.2 De doorstroming op kruispunten

De doorstroming van het verkeer is geanalyseerd op basis van door het model bepaalde reistijden, intensiteiten en het aantal voertuigen door een groenfase. Deze paragraaf beschrijft de resultaten op hoofdlijnen. Meer resultaten en figuren zijn opgenomen in Appendix D.

3.2.1 Reistijden

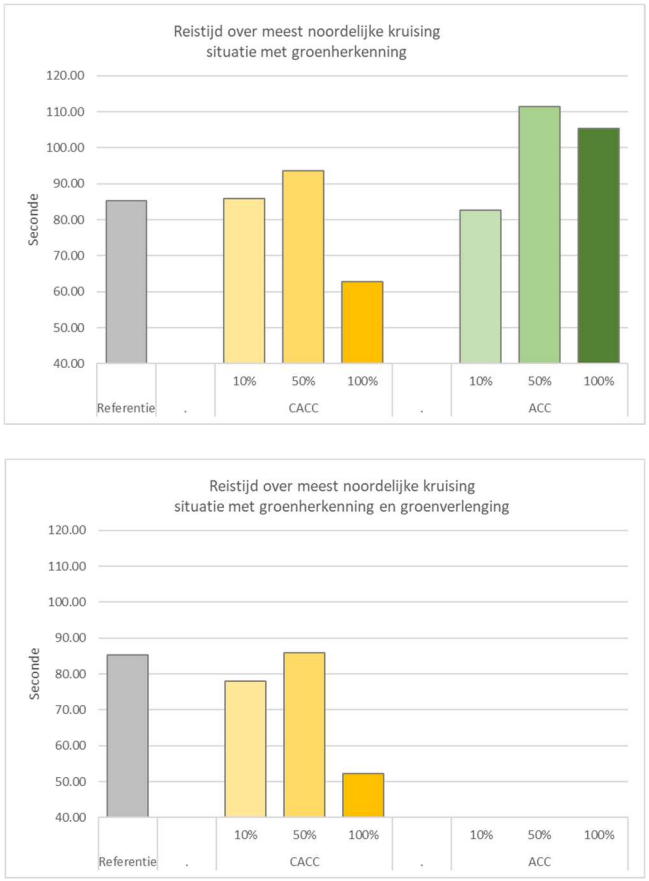
In de simulatie zijn twee soorten reistijden gemeten; de reistijd over het kruispunt en de reistijd op het traject. De resultaten ten opzichte van het referentiescenario zijn samengevat in Figuur 3.2.

De resultaten van de reistijden over de kruisingen verschillen per kruising, maar laten telkens een vergelijkbaar patroon zien: ten opzichte van het referentiescenario laten de scenario's met ACC de langste reistijd zien, waarbij geldt dat hoe meer voertuigen ACC hebben, hoe langer de gemiddelde reistijd is. Voor CACC geldt dat het scenario met 100% CACC de beste resultaten laat zien. Daarnaast geldt dat groenverlenging

tot kortere reistijden leidt op de doorgaande rijrichting, maar langere op de kruisende richtingen.

In Figuur 3.2 zijn de resultaten weergegeven van de reistijden over het drukste kruispunt. In de figuur is te zien dat een gemiddeld voertuig in het referentiescenario er 85 seconden over doet om het drukste kruispunt te overbruggen. In het CACC scenario met 100% penetratiegraad, het best presterende scenario, is dit 52 seconden, een verbetering van 39%. Wat in de figuur opvalt is dat het scenario met een CACC penetratiegraad van 50% een verslechtering van de reistijden laat zien. Een mogelijke verklaring ligt in het feit dat een groot deel van de CACC-voertuigen op ACC-modus rijdt, omdat de voorligger vaak niet beschikt over CACC. Het percentage voertuigen dat het CACC systeem dus daadwerkelijk gebruikt ligt in de simulatie dus lager dan de ingestelde 50%. Voertuigen die met ACC rijden zorgen juist voor een verslechtering van de reistijden. Redenen voor de slechtere doorstroming bij ACC zijn:

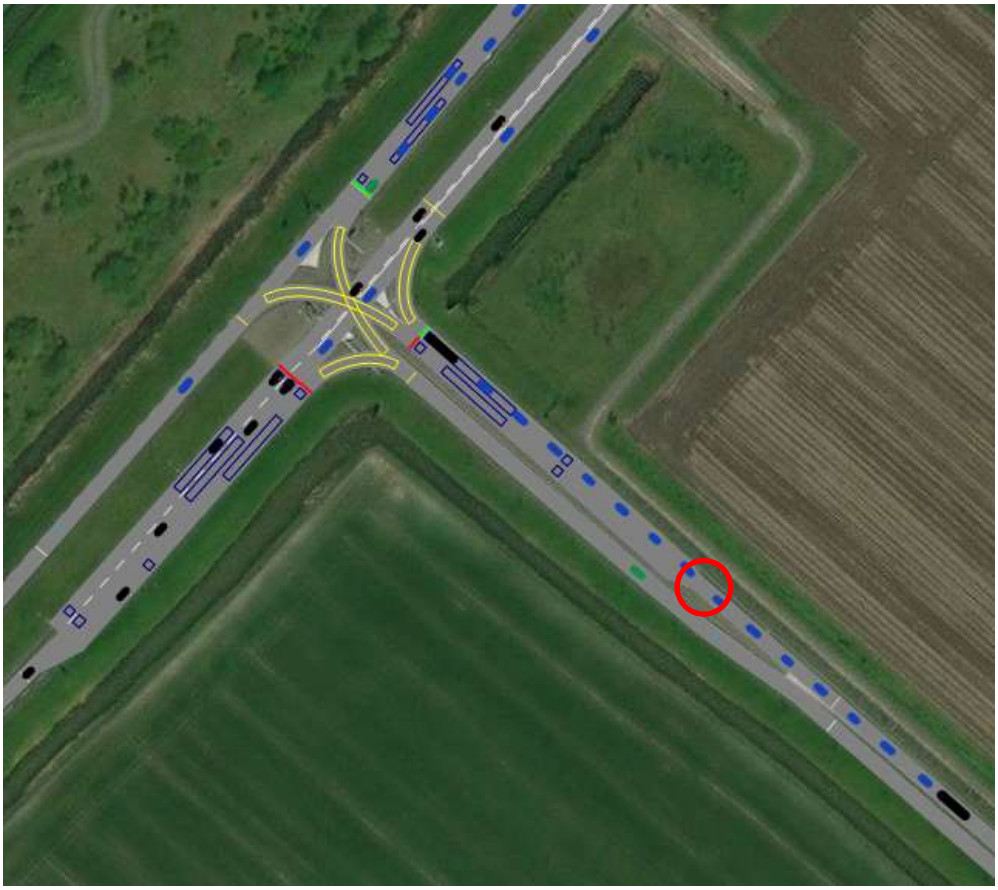
- De ACC accelereert langzamer dan handmatig bestuurde voertuigen;
- De ACC heeft een grotere tijdsvertraging (de tijd tussen een verandering in snelheid bij de voorligger en het moment dat het voertuig zelf ook van snelheid verandert) dan handmatig bestuurde voertuigen (in de simulatie);
- Tijdens het invoegen voor een ACC-voertuig treden sterke remacties op als de ACC niet wordt uitgeschakeld. Om dit te voorkomen wordt het ACC systeem tijdens deze situaties in de simulaties uitgeschakeld. Dit aan/uitschakelgedrag leidt tot onrustig rijgedrag.



Figuur 3.2: reistijd in seconden over de noordelijkste kruising (kruising Drie Merenweg en Schipholweg) in de doorgaande rijrichting van **zuid naar noord** bij **hoge verkeersdrukte**

De gemiddelde reistijd over het gehele traject op de doorgaande richting vertoont andere patronen dan per kruispunt. Waar het scenario met 100% penetratiegraad van CACC een kortere reistijd op kruispunten laat zien, neemt de reistijd over het hele traject toe met 4% en 8%, afhankelijk van de richting (noord-zuid of zuid-noord). Voor het scenario met 100% penetratiegraad van ACC neemt de reistijd met 144% toe ten opzichte van het referentiescenario. Een verklaring hiervoor ligt bij de volgafstand die de ACC en CACC systemen hanteren. Deze volgafstand wordt ook toegepast bij stilstand en is minimaal 5 meter (Figuur 3.3). Hierdoor worden de voorsorteerstroken veel minder optimaal gebruikt en ontstaat er een blokkade van voorsorteerstroken naar de andere richtingen. De kruising is hierdoor niet in staat het verkeer met een normale capaciteit af te wikkelen, wat leidt tot grote filevorming op deze rijstrook (zie ook de procentuele effecten in Tabel 3.1). Theoretisch is deze extra veiligheidsafstand niet nodig. In een volgende versie die op dit punt verder is ontwikkeld en getest kan de volgafstand bij stilstand veel kleiner zijn. De doorstromingsresultaten zijn beoordeeld op de totale reistijd over alle individuele kruisingen heen, in plaats van over het gehele traject, vanwege de doorstromingsproblemen op de toeleidende weg naar deze specifieke kruising. Met de huidige CACC daalt de capaciteit van dit soort kruisingen, maar in de toekomst wordt deze capaciteit weer gelijk aan de huidige capaciteit, omdat de extra veiligheidsafstand verdwijnt.

De reistijd op de kruisende richtingen laat in bijna alle gevallen een toename zien ten opzichte van de referentie en ten opzichte van de doorgaande rijrichting. Met groenverlenging is de reistijd langer dan zonder groenverlenging, wat te verwachten is omdat de groenverlenging wordt verleend voor de doorgaande richtingen. De kruisende richtingen krijgen daarom langer rood. Dat de reistijd ook zonder groenverlenging verslechtert op de kruisende richtingen, komt wellicht door het feit dat de CACC het beste presteert in druk verkeer, zoals we eerder zagen. Op de kruisende richtingen is het immers rustiger dan op de doorgaande richting. Omdat het rustig is op de kruisende richtingen hebben de CACC voertuigen op die richtingen weinig andere CACC voertuigen in de buurt om pelotons mee te vormen en daarmee de voordelen van het systeem optimaal te benutten. Er wordt op de kruisende richtingen daardoor relatief vaker met ACC gereden, wat een verslechtering met zich meebrengt.



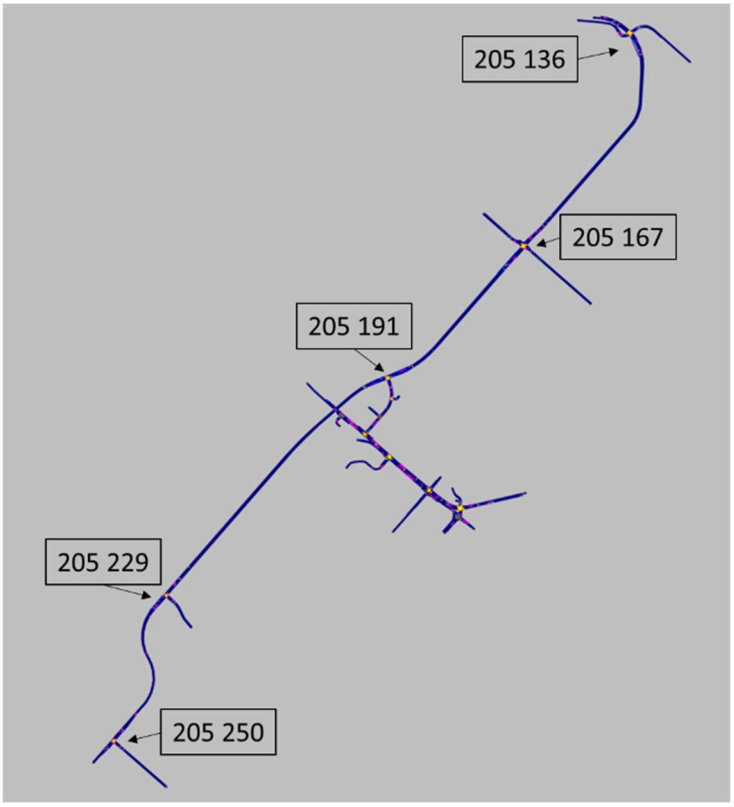
Figuur 3.3 Voorbeeld van 100% ACC op zuidelijke kruising van Driemeren weg met Noordelijke Randweg. Op deze kruising wordt de linker voorsorteerstrook geblokkeerd. De rode cirkel geeft de locatie van de geblokkeerde linkerstrook weer.

Tabel 3.1 procentuele verandering in reistijd ten opzichte van het referentiescenario richting zuid-noord bij druk verkeer

verkeer	136	167	191	229	250	alle kruisingen	hele traject
CACC 10%	1%	2%	6%	6%	2%	3%	-1%
CACC met groenverlenging 10%	-9%	-4%	6%	4%	4%	-2%	1%

CACC 50%	10%	10%	13%	5%	11%	10%	3%
CACC met groenverlenging 50%	1%	3%	9%	3%	6%	4%	6%
CACC 100%	-26%	-2%	-5%	-3%	4%	-10%	2%
CACC met groenverlenging 100%	-39%	-15%	-9%	-6%	-3%	-19%	4%
ACC 10%	-3%	2%	9%	9%	4%	3%	2%
ACC 50%	31%	31%	99%	29%	22%	42%	10%
ACC 100%	24%	42%	139%	31%	72%	55%	50%

De kruising nummering voor de kruisingen van de N205 is gegeven in Figuur 3.4.



Figuur 3.4 Kruising nummering op de N205.

Er zijn zowel redenen te benoemen voor een verbetering van de doorstroming door CACC, als voor een verslechtering, door verschillende effecten van het systeem.

Redenen voor verbetering van de doorstroming door CACC zijn:

- Voertuigen waar een CACC systeem is ingebouwd, kunnen sneller achter elkaar optrekken dan normale voertuigen. Er kunnen meer voertuigen door een groenfase.
- CACC-voertuigen reageren sneller op de voorligger, waardoor er minder instabiliteiten optreden die tot filevorming kunnen leiden (denk bijvoorbeeld aan het ‘harmonica effect’ waarbij de afstand tot de voorligger afwisselend kleiner en groter wordt).

Bij een penetratiegraad van 50% en minder CACC, worden de reistijden niet korter. Redenen voor langere reistijden bij CACC zijn dan:

- Het voorste voertuig van een CACC peloton rijdt niet met CACC maar met ACC. Hoe meer voertuigen met ACC rijden, hoe minder positief het effect op de doorstroming.
- Interactie met andere voertuigen en het aan- of uitschakelen van (C)ACC leidt tot verstoringen van de verkeersstroom, waardoor instabiliteiten op kunnen treden die tot remacties en filevorming kunnen leiden.

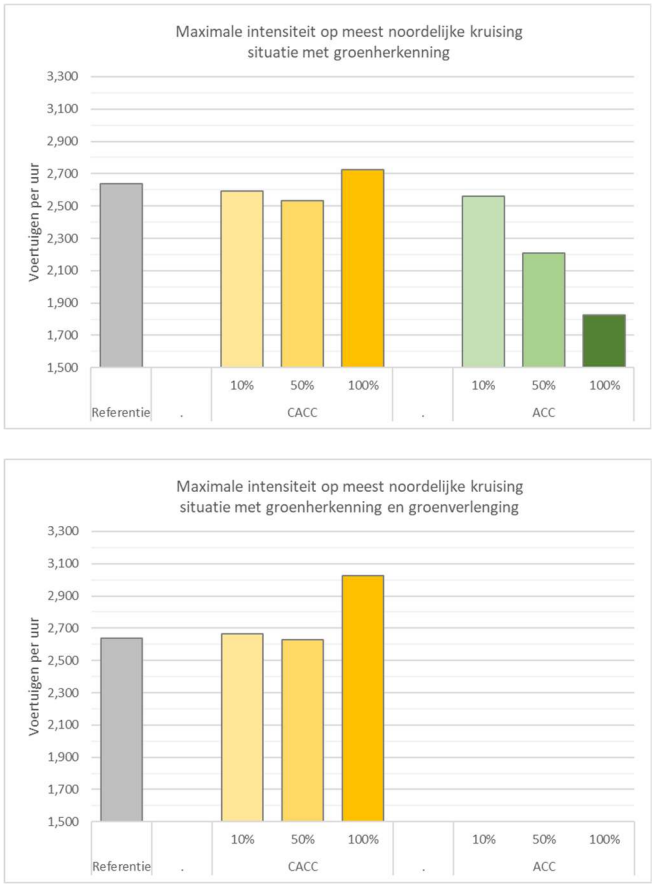
Daarnaast zijn er ook redenen waarom zelfs bij hogere penetratiegraden van CACC de reistijden langer kunnen zijn dan bij enkel handmatig gereden voertuigen. Het netto effect kan dus zowel positief als negatief zijn, wat we ook hebben gezien in de resultaten van de reistijden.

- Om in een peloton te kunnen blijven rijden, worden iets lagere snelheden geaccepteerd dan de gewenste snelheid. Voertuigen waar ACC en CACC is ingebouwd accepteren een snelheid tot 5% langzamer dan hun gewenste snelheid. Deze waarde is een expert aanname in de modelstudie.
- De afstand tot het voorgaande voertuig bij stilstand is groter voor voertuigen waar ACC en CACC is ingebouwd. Wanneer voertuigen wachten voor een verkeerslicht kunnen er – door de lange afstand tussen voertuigen – minder voertuigen staan op de huidige voorsorteerstroken. Dit heeft als gevolg dat sommige stroken voor afslaande richtingen niet bereikt kunnen worden door de wachtrij voor doorgaande richtingen.
- De volgtijd was in deze praktijktest en simulatiestudie nauwelijks kleiner dan van normale voertuigen. Bij een ingestelde volgtijd van 0,6 sec komt ook een vaste veiligheidsafstand van 5 meter, waardoor de gemiddelde volgafstand in de praktijk 0,9 sec was. Van de handmatige bestuurders was dit rond de 1,2 sec, zo bleek uit de positiegegevens van de praktijktestvoertuigen. Hierdoor was er nauwelijks een capaciteitsverbetering.

3.2.2 Intensiteit

De intensiteit, of het aantal voertuigen dat per tijdseenheid een bepaalde locatie passeert, is in de simulaties gemeten op ongeveer 200 meter na elke kruising. Intensiteiten worden aangegeven per rijbaan. Om te kijken naar de maximale intensiteit die een kruispunt kan verwerken is er gekeken naar de maximale waarde per minuut. Deze maximale intensiteit is voor drukke kruispunten een benadering van de capaciteit. Op deze manier is een inschatting te maken van het effect van ACC en CACC op de capaciteit van een kruispunt; de maximale intensiteit die het kruispunt per uur kan verwerken. Deze methodiek is alleen toe te passen voor drukke kruispunten. Op rustigere kruispunten ligt de intensiteit namelijk veel lager dan de capaciteit.

In Figuur 3.5 is te zien dat de maximale intensiteit die het noordelijkste kruispunt kan verwerken, het hoogst ligt voor het scenario met een CACC penetratiegraad van 100%. Zoals verwacht verschilt dit effect ten opzichte van de rustigere kruispunten. In Appendix D zijn de overige figuren te zien. De figuren geven aan dat op verschillende rustige kruisingen, 100% CACC juist voor een lagere intensiteit zorgt dan in het referentiescenario. Op rustige kruispunten zijn er minder CACC voertuigen die in pelotons het kruispunt naderen, waardoor de intensiteit die het kruispunt verwerkt juist afneemt.



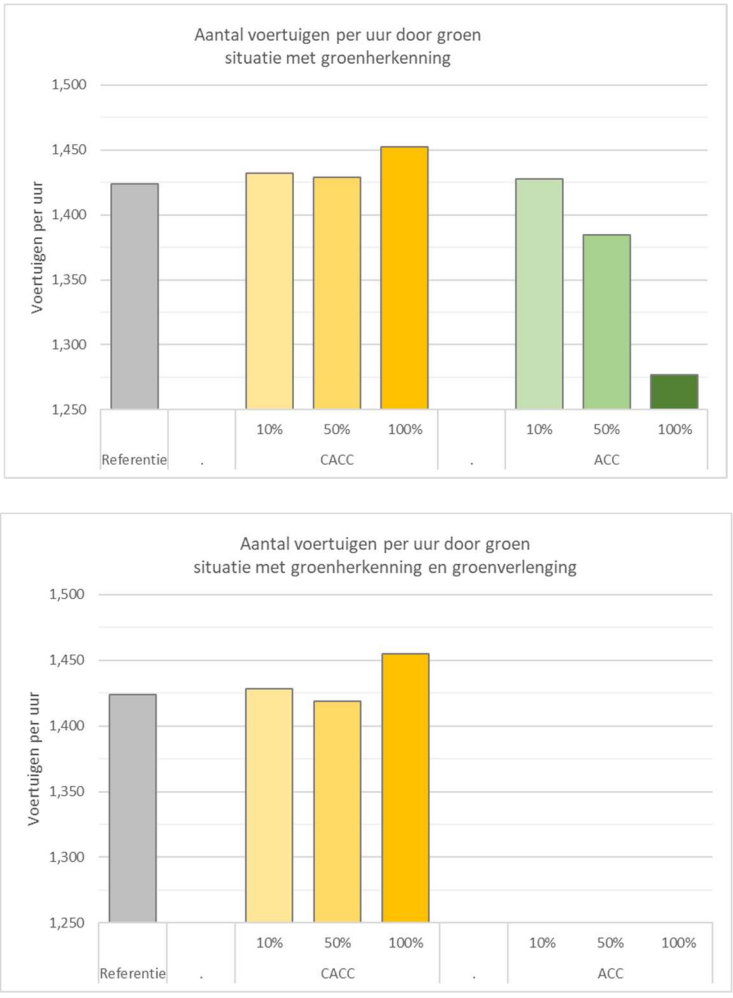
Figuur 3.5 Maximale intensiteit (aantal voertuigen per uur) bij hoge drukte van zuid naar noord op meest noordelijke kruising; kruising van Drie Merenweg met de Schipholweg.

3.2.3 Aantal voertuigen door een groenfase

Om het effect van groenherkenning en groenverlenging te analyseren, is ook gekeken naar het gemiddeld aantal voertuigen dat tijdens de groenfasen de stopstreep passeert. Deze waarde wordt bepaald door het totale aantal voertuigen tijdens groen te delen door de totale groentijd. In Figuur 3.6 staan de resultaten voor alle scenario's bij hoge verkeersdrukte. De overige scenario's zijn beschreven in Appendix D.

De resultaten van Figuur 3.6 laten een vergelijkbaar beeld zien als de vorige resultaten. In het referentiescenario met groenherkenning rijden 1,9% meer voertuigen per uur door groen dan in het referentiescenario zonder groenherkenning. De scenario's met CACC voertuigen leveren verglijkbare resultaten op als het referentiescenario. Alleen bij een penetratiegraad van 100% wordt er een toename van het aantal voertuigen waargenomen van respectievelijk 2,3% en 2,2% voor de scenario's zonder en met groenverlenging, respectievelijk.
Het is opmerkelijk dat groenverlenging én groenherkenning samen een kleiner effect hebben op het aantal voertuigen door groen dan alleen groenherkenning (bij 50% penetratiegraad). Waarschijnlijk is dit te verklaren doordat de totale groenperiode door de verlenging langer is, terwijl er tijdens de simulatie in totaal evenveel voertuigen het kruispunt passeren. In het rustige scenario is de verbetering respectievelijk 0,4% en 0,5% zonder en met groenverlenging, respectievelijk. In het

rustige scenario resulteert groenverlenging en groenherkenning dus wél in een voordeel.
ACC laat in de simulatie opnieuw een negatief effect zien. Hoe hoger het percentage ACC-voertuigen, hoe minder voertuigen door één groenfase heen kunnen. In het drukke scenario is er bij 100% ACC een afname van ruim 10% van het aantal voertuigen door groen per uur. De effecten bij lage verkeersdrukte zijn anders dan bij hoge verkeersdrukte. Dat is te verklaren omdat bij lage verkeersdrukte vaker alle wachtende voertuigen door een groenfase van minimale lengte kunnen. In dat geval maakt het voor het gemiddelde niet uit of voertuigen met systeem dat sneller of langzamer doen dan bij het referentie scenario.



Figuur 3.6: Gemiddeld aantal voertuigen door groen per uur bij hoge verkeersdrukte

3.3 Het opsplitsen van pelotons

Met de simulatiestudie is ook onderzocht hoeveel pelotons van (C)ACC-voertuigen er zijn, uit hoeveel voertuigen ze bestaan en hoe dit verandert door het passeren van kruispunt of invoegende voertuigen.

3.3.1 Door een kruispunt

Uit de simulatieresultaten van de meest noordelijke kruising blijkt dat de pelotonlengte na de kruising langer is, in vergelijking met de pelotonlengte voor de kruising. Meer detail van de resultaten is te zien in Appendix D. De toename van het aantal pelotonvoertuigen is het grootst in het scenario met een CACC penetratiegraad van 100%. De toename is groter in druk verkeer dan in rustig verkeer. Het effect van de toegenomen pelotonlengte als gevolg van kruispunten is te verklaren doordat wachtende pelotons samenvoegen wanneer ze voor rood licht staan. Dit effect is groter bij hogere penetratiegraden omdat er dan meer geschikte voertuigen in het netwerk zijn waarmee een peloton gevormd kan worden. Uit de simulatie blijkt dat het effect van het opsplitsen van pelotons door rood licht kleiner is dan de toename aan pelotons en pelotonlengtes als gevolg van wachtende voertuigen. Door de pelotons komen voertuigen meer gegroepeerd aan bij kruispunten waardoor groenverlenging voor pelotons potentieel veel kan verbeteren wat betreft de doorstroming.

3.3.2 Invoegende voertuigen

Invoegende voertuigen komen op het traject voor wanneer het aantal rijstroken afneemt van 2 naar 1 strook of van 3 naar 2 stroken. Het gevonden effect verschilt voor de invoeger van 2 naar 1 strook en voor de invoeger van 3 naar 2 stroken. Meer detail over de resultaten is de vinden in Appendix D.

Bij de invoeger van 2 naar 1 in druk verkeer neemt de pelotonlengte toe. Dit is te verklaren doordat de invoegende voertuigen leiden tot een zekere vertraging waardoor pelotons weer worden samengevoegd. Anderzijds kan het invoegende voertuig zich aansluiten bij het peloton. Het kan ook gebeuren dat een niet uitgerust voertuig het peloton onderbreekt. De simulatie laat zien dat het effect daarvan kleiner is dan het effect van het samenvoegen, immers, zowel het aantal pelotons als de gemiddelde pelotonlengte neemt toe. In rustig verkeer neemt het aantal pelotons ook toe, maar er is een wisselend effect op de pelotonlengte bij een invoeging van 2 naar 1 strook.

Voor de invoeging van 3 naar 2 stroken is er geen consistent effect op de pelotonlengte en het aantal pelotons gevonden. Een verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat er bij een invoeging van 3-naar-2 stroken meer mogelijkheden zijn om de invoeging op te vangen, bijvoorbeeld door het invoegende voertuig ruimte te geven door van de middelste strook naar de rechterstrook te wisselen. Er hoeft dan niet of minder geremd te worden voor de invoeger, zodat er minder pelotons worden samengevoegd. De invoegende voertuigen kunnen zowel tot langere als kortere pelotons leiden.

3.4 **De verkeersveiligheid**

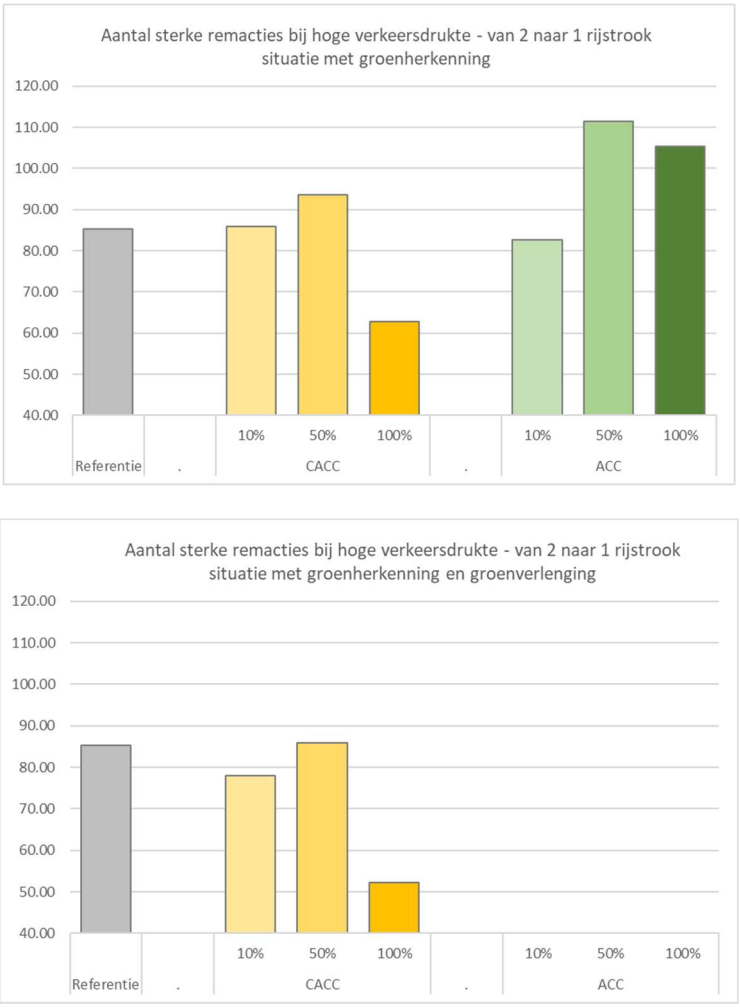
De effecten op de verkeersveiligheid zijn bepaald door te kijken naar het percentage sterke remacties en het percentage kritische time-to-collisions. Een sterke remactie treedt op bij een vertraging van het voertuig van meer dan 2,5 m/s^2. De time-to-collision is de tijd totdat twee voertuigen zouden botsen indien ze hun snelheid en koers niet aan zouden passen. Een duur van 3 seconden is als kritische waarde

genomen. Voor beide parameters is er bepaald welk percentage de kritische waarde overschrijdt.

De verkeersveiligheid is alleen beoordeeld op locaties waar kritische situaties zijn te verwachten. Dit zijn de locaties waar er een rijstrook verdwijnt. Er zijn twee locaties waar het aantal rijstroken van drie naar twee gaat, en één locatie waar het aantal rijstroken van twee naar één gaat. De simulatie kan het effect op kop-staart aanrijdingen niet bepalen. Dit komt omdat de gesimuleerde voertuigen bij het aanrijden op kruisingen niet met het CACC systeem reden, omdat er geen koppeling is met de fase van het verkeerslicht, zodat een voertuig met het systeem aan niet uit zichzelf zou stoppen voor rood licht. Overschakelen naar handmatig rijden is daardoor noodzakelijk.

3.4.1 Sterke remacties

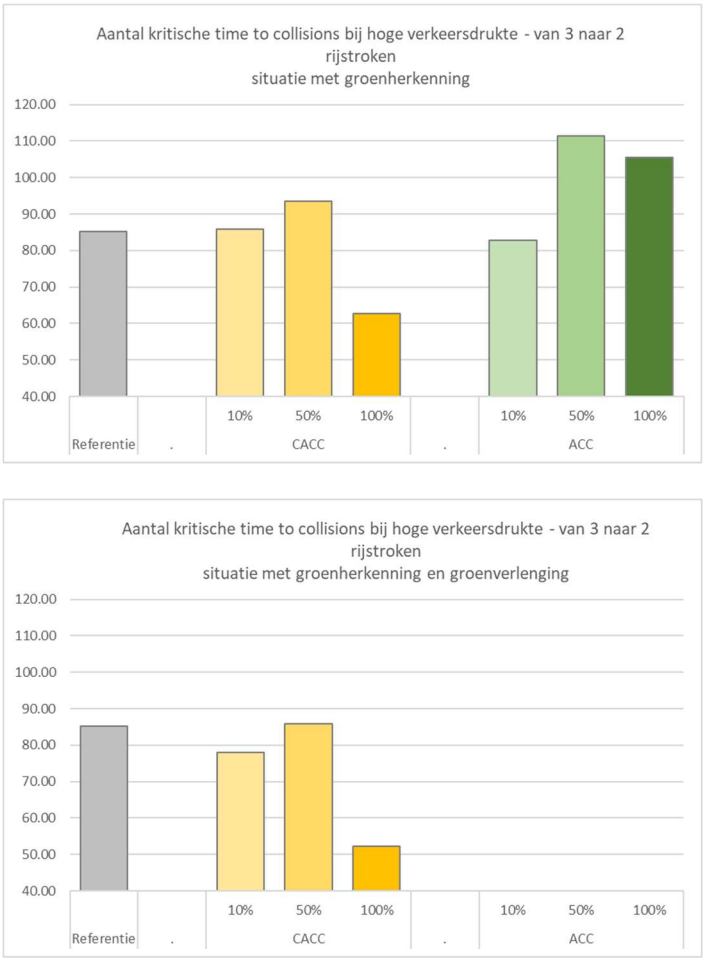
In Figuur 3.7 staat het aandeel sterke remacties bij locatie van 2-naar-1 rijstrook weergegeven. In dit figuur is te zien dat een hogere penetratie ACC of CACC-voertuigen leidt tot een groter aandeel sterke remacties. Dit resultaat lijkt tegenstrijdig omdat tijdens het rijden met CACC geen sterke remacties plaats zouden moeten vinden. Bij invoegsituaties ontstaan er echter situaties waar het CACC systeem niet altijd op kan reageren met een beperkte remactie tot 2,5 m/s^2. Indien het voertuig sterker moet remmen, dan wordt de (C)ACC uitgeschakeld en remt het voertuig af. Aangezien de CACC met een korte volgafstand rijdt, ontstaan er bij invoegingen al snel situaties waarbij een sterke remactie nodig is.
De veiligheid kan verder verhoogd worden door grotere remacties en (tijdelijk) kortere volgafstanden toe te staan bij het CACC systeem, zodat de bestuurder niet zelf hoeft in te grijpen. Ook zou met een Lane Change Assistant het invoegen op een soepelere manier geregeld kunnen worden door communicatie tussen de betrokken voertuigen.



Figuur 3.7 Aandeel remacties < 2.5 m/s2 bij hoge verkeersdrukte

3.4.2 Time-to-collision

Figuur 3.8 laat het aandeel times-to-collision bij een invoeglocatie, bij hoge verkeersdrukte zien onder de kritieke waarde van 3 seconden. Als de time-to-collision onder deze kritische waarde komt, is er sprake van een potentieel onveilige situatie die in sommige gevallen tot een ongeval kan leiden. Het aandeel kritische time-to-collisions is heel erg laag. In veel scenario's komen zelfs helemaal geen kritische time-to-collisions voor. Dat betekent dat de CACC en ACC bijna nooit tot gevaarlijke situaties hebben geleid in de simulaties. De scenario's waar er enkele kritische time-to-collisions zijn opgetreden laten geen duidelijk verklaarbaar beeld zien en statistisch zijn te weinig gegevens beschikbaar om conclusies uit te kunnen trekken. De resultaten voor de time-to-collision onder lage verkeersdrukte geven eenzelfde beeld. Meer detail is opgenomen in Appendix D.



Figuur 3.8 Aandeel TTC's < 3 sec bij hoge verkeersdrukte

3.5 Conclusies

De simulatiestudie heeft de effecten bepaald van het rijden met ACC en CACC op de doorstroming en verkeersveiligheid. Daarnaast is er gekeken naar het aantal en de gemiddelde lengte van pelotons.

De doorstroming op kruispunten is geanalyseerd op basis van de simulaties van alle verschillende scenario's en vergeleken met het referentiescenario. De doorstroming van het verkeer is geanalyseerd op basis van door het model bepaalde reistijden, intensiteiten en het aantal voertuigen door een groenfase. Het ACC systeem laat over het algemeen een verslechtering zien. CACC is voornamelijk gunstig bij hoge penetratiegraden waarbij meer dan 50% van de voertuigen is uitgerust met dit systeem.

Een hogere penetratiegraad van ACC of CACC-voertuigen leidt in de simulatie tot een groter aandeel sterke remacties. Dit resultaat lijkt tegenstrijdig omdat tijdens het rijden met CACC geen sterke remacties plaats zouden moeten vinden. Bij invoegsituaties ontstaan er echter situaties waar het CACC systeem niet altijd op kan reageren met een beperkte remactie. In dat geval moet de bestuurder de rijtaak overnemen; indien het voertuig sterker zou moet remmen om een botsing te

voorkomen, wordt de (C)ACC uitgeschakeld en remt de bestuurder handmatig. Aangezien de CACC met een kortere volgafstand rijdt, ontstaan er bij invoegingen al snel situaties waarbij een sterke remactie nodig is. CACC en ACC hebben daarentegen vrijwel niet tot gevaarlijke situaties geleid waarbij de time-to-collission kleiner dan 3 seconden was. De scenario's waar er enkele kritische time-to-collisions zijn opgetreden laten geen duidelijk verklaarbaar beeld zien en statistisch zijn te weinig gegevens beschikbaar om conclusies uit te kunnen trekken.

Het aantal pelotons en de gemiddelde pelotonlengte veranderen voornamelijk rondom situaties waarbij wordt ingevoegd en na kruispunten. Voor de invoeging van 2 naar 1 strook in druk verkeer neemt het aantal pelotons toe evenals de gemiddelde pelotonlengte. In rustig verkeer neemt het aantal pelotons ook toe maar is er geen consistent effect op de pelotonlengte. Voor de invoeging van 3 naar 2 stroken is geen consistent effect op de pelotonlengte en het aantal pelotons gevonden.

4 Opschaling

De resultaten van de simulaties laten de effecten zien op een relatief klein netwerk bij twee niveaus van drukte. In dit hoofdstuk wordt een inschatting gedaan van de verwachte effecten bij invoering van CACC op grotere schaal in de provincie Noord-Holland, als op het gehele wegennet in Noord-Holland door alle voertuigen met CACC gereden zou worden.

4.1 **Methode voor opschaling**

De gehanteerde methode van opschaling gaat ervan uit dat het effect van CACC op provinciale wegen met name bepaald wordt bij de kruisingen, omdat kruisingen doorgaans bepalend zijn voor de capaciteit. Vervolgens is er vanuit gegaan dat vergelijkbare kruisingen een vergelijkbaar effect hebben. Het effect dat in de simulaties gevonden is voor de verschillende typen kruisingen uit de simulatie, is gebruikt als effect bij gelijksoortige relevante kruisingen uit de provincie.

Eerst is nagegaan welke wegen in de provincie Noord-Holland relevant zijn qua verkeersdrukte, aangezien de effecten het grootst zijn bij hoge verkeersdrukte. De wijze waarop deze wegen en de relevante kruisingen geselecteerd zijn, en een lijst van alle kruisingen waarvoor de resultaten zijn opgeschaald, is opgenomen in Appendix E. Er waren geen gedetailleerde data beschikbaar over deze kruisingen. Daarom zijn alle kruisingen met behulp van Google Maps bekeken om het aantal stroken per richting en de snelheidslimiet te documenteren. Vervolgens zijn de kruisingen geclassificeerd op basis van het aantal stroken en de geschatte verkeersvraag. Hieruit zijn zes categorieën afgeleid die gematcht zijn met de kruisingen in de simulaties. Voor elk van deze categorieën is er ook minstens een overeenkomende kruising in het simulatienetwerk.

4.1.1 Schatting van de verkeersvraag voor de opschaling

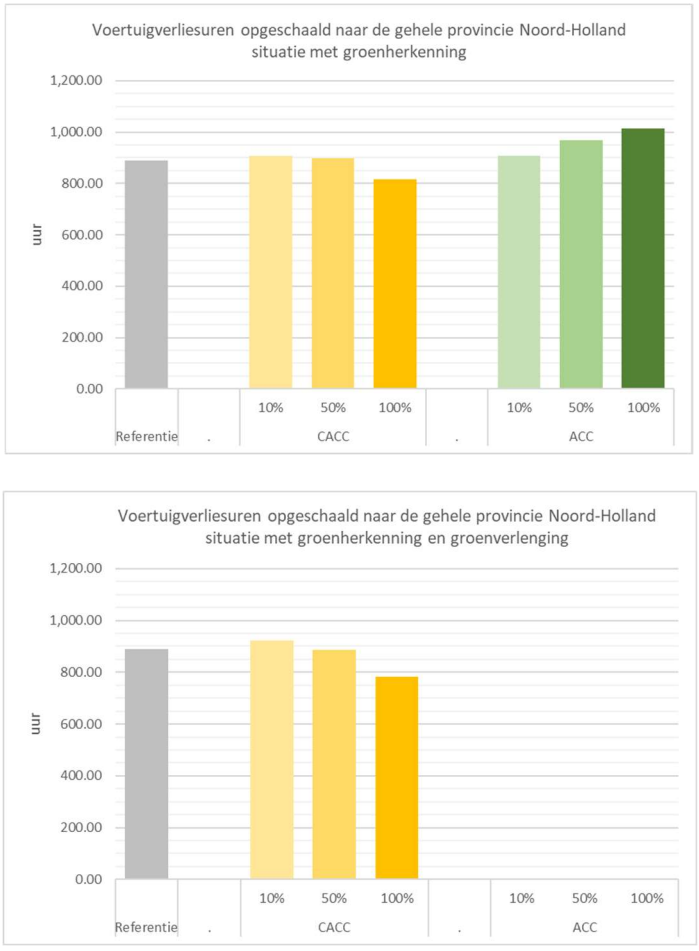
De effecten uit de simulatie zijn opgeschaald door de effecten per voertuig te vermenigvuldigen met het totale verkeersvolume op de doorgaande richting van elke kruising. Er was geen informatie beschikbaar van de intensiteit van de kruisende richtingen. Het effect van de kruisende richtingen zal sowieso klein zijn omdat de intensiteit van deze richtingen veel lager is. Aannames die gedaan zijn voor de schatting van de verkeersvraag staan in Appendix B 8.6.

4.2 **Resultaten van de opschaling**

De resultaten van de opschaling zijn uitgedrukt in de totale hoeveelheid voertuigverliesuren in de gehele provincie Noord-Holland (op de geselecteerde wegen/kruispunten) op een gemiddelde werkdag. Hiervoor zijn de resultaten van de spitsperiode (het hoge drukteniveau) opgeschaald naar twee spitsperiodes per dag en van het lage drukteniveau opgeschaald naar de rest van de dag.

Net als bij de simulatiestudie bevat het opgeschaalde scenario met 100% CACC en groenverlenging het minste aantal voertuigverliesuren vergeleken met de overige scenario’s. Ten opzichte van de referentie met alleen handmatig bestuurde

voertuigen zijn er 12% minder voertuigverliesuren per etmaal. Zonder groenverlenging is er nog een winst van 8%. 100% ACC leidt tot een toename van 14% van het aantal voertuigverliesuren (zie Figuur 4.1).



Figuur 4.1 totale hoeveelheid voertuigverliesuren per etmaal voor alle scenario's voor alle geselecteerde kruisingen in Noord-Holland bij elkaar

5 Conclusies en aanbevelingen

De verkeerskundige effecten van de invoering van ACC en CACC op het wegennet van de provincie Noord-Holland zijn geschat aan de hand van een simulatiestudie. Voorafgaand aan de simulatiestudie is een praktijktest op de weg uitgevoerd, die gebruikt is als input voor de simulatiestudie.

Uniek aan de proef is de implementatie van CACC voertuigautomatisering tezamen met de communicatie tussen voertuigen en intelligente kruispunten. Er is aangetoond dat de proef op veilige wijze gedurende een volle werkweek op de openbare weg tussen regulier verkeer kon worden uitgevoerd.

5.1 **Conclusies**

De onderlinge volgafstand van de voertuigen in het peloton was 0,6 seconden plus een vaste volgafstand van 5 meter. Deze volgafstand was niet opvallend korter of langer dan de volgafstand die door regulier verkeer gehanteerd wordt. Het grote verschil is wel dat CACC op deze afstanden direct reageert op snelheidsverschillen van de voorligger. Voor wat betreft volgtijd van 0.8s.

De ervaring van de bestuurders was dat het peloton van 3 of 7 voertuigen niet of nauwelijks als zodanig werd opgemerkt tijdens de praktijktest. Ook is gebleken dat andere bestuurders van personenwagens bij de gehanteerde volgafstanden nog zonder twijfel tussen het peloton van uitgerustte voertuigen durfden in te voegen (zowel bij 3 als 7 voertuigen). Het aanpassen aan deze invoeger door de CACC voertuigen gebeurde steeds op een vloeiende, comfortabele en onopvallende wijze. Voor een bestuurder die achter het peloton reed was dit niet of nauwelijks merkbaar en dit leidde dan ook niet tot acties als plotselinge remmingen of uitwijkmanoeuvres.

De door TNO geïnstalleerde hard- en software om deze proef mogelijk te maken heeft zich gedurende de testweek robuust getoond en heeft steeds zo gefunctioneerd zoals bedoeld. De ACC en CACC functies van TNO waren daarmee van zodanige kwaliteit dat de resultaten van de proef representatief voor productiemodellen kunnen worden geacht.

Naast bovengenoemde observaties heeft TNO ook onderzoek gedaan naar de belevingen van de testrijders van de praktijktest. Het rijden met ACC werd significant als onplezieriger gezien dan handmatig rijden dan wel rijden met CACC. Dit laat zich ook zien in een significant hoger gevoel voor noodzaak tot ingrijpen vergeleken met CACC en handmatig rijden. Tevens rapporteerden de bestuurders een algemeen beeld van de proef waarbij ACC significant meer voelt zoals een proef dan als natuurlijk rijden. Er was geen significant verschil is rijplezier tussen CACC en handmatig rijden. Het rijplezier is sterk afhankelijk van de positie in het peloton. Wanneer men zich verder in het peloton bevindt gaat het rijplezier omlaag voor alle drie de soorten ondersteuning.

De conclusies van de simulatiestudie zijn als volgt:

ACC heeft vrijwel altijd een negatief effect op de doorstroming, hoe hoger het percentage ACC-voertuigen, hoe minder goed het resultaat is voor de doorstroming.

CACC heeft positieve effecten op de doorstroming in het scenario met 100% CACC. Dit zien we als gekeken wordt naar de reistijd en het aantal passages (intensiteit) over kruisingen. Bij druk verkeer is het positieve effect het grootst. Als ook nog groenverlenging wordt gebruikt bij de intelligente verkeerslichten is het positieve effect nog een klein beetje groter.
Bij 50% CACC is er sprake van een lichte verslechtering van de doorstroming. De belangrijkste oorzaak hiervoor is waarschijnlijk dat een deel van de CACC-voertuigen (de voertuigen zonder CACC-voertuig voor zich) met ACC rijden, wat een negatief effect heeft. Ook wordt de CACC soms uitgeschakeld, zodat het werkelijke percentage CACC veel lager ligt dan 50%. Vermoedelijk zou er wel een verbetering gehaald kunnen worden als de voertuigen zonder CACC voertuig voor zich zouden omschakelen naar handmatig rijden.
Bij 10% CACC is er vrijwel geen effect. Er zijn dan bijna geen pelotons, zodat er voornamelijk met ACC wordt gereden, maar het aandeel van deze voertuigen is zo klein dat er bijna geen (negatief) effect is.
Op rechte stukken met slechts 1 strook richting een kruising met voorsorteerstroken neemt de capaciteit af, ook bij 100% CACC. De belangrijkste reden hiervoor is de grotere afstand bij stilstaan, i.v.m. veiligheid tijdens de praktijktest met prototype software, waardoor de andere voorsorteerstroken worden geblokkeerd.

Groenverlenging leidt tot betere doorstroming op de doorgaande richting, echter tot verslechtering op de kruisende richtingen. Maar omdat er op de kruisende richtingen minder verkeer zit, is er netto toch sprake van een positief effect op de totale doorstroming van het autoverkeer.

De veiligheid rondom invoegsituaties verbetert niet door CACC. De bestuurder moet in de simulaties bij invoegingen regelmatig ingrijpen met een remactie die groter is dan wat het systeem aan kan. Dit komt doordat bij invoegingen CACC terugschakelt naar ACC om zo snel mogelijk op een veilige volgafstand te komen. Een normale bestuurder zal voor een langere tijd een hoger veiligheidsrisico accepteren en daarom minder heftig remmen. In de simulaties komen dan ook zeer weinig echt kritische situaties voor, zodat de verkeersveiligheid met CACC goed geacht wordt. De veiligheid kan verder verhoogd worden door grotere remacties toe te staan bij het CACC systeem.

Vermoedelijk werkt het CACC systeem veiligheidsverhogend bij afremmen bij kruispunten, aangezien het systeem automatisch afremt als de voorligger afremt, en zou zo kop-staartbotsingen kunnen voorkomen. Dit kon echter niet getoetst worden in de simulaties.

Als de resultaten van de verbeterde doorstroming bij 100% CACC met groenverlenging worden opgeschaald voor de hele provincie Noord-Holland, leidt dat naar schatting tot een afname van 12% van alle voertuigverliesuren op een gemiddelde werkdag.

5.2 Aanbevelingen en vervolgonderzoek

Volgafstanden en doorstroming
Om de potentie van CACC voor de doorstroming te verhogen, kan onderzocht worden of het haalbaar is om met kortere volgafstanden te rijden en ook bij stilstand

een kortere afstand tot de voorligger aan te houden, zodat wachtrijen korter zullen zijn en voorsorteerstroken niet geblokkeerd worden. In de huidige simulatieomgeving kan eenvoudig worden onderzocht wat het effect is van een kortere volgafstand.

Ook is een interessante vraag voor vervolgonderzoek in welke situaties de (C)ACC in de praktijk wordt aan- en uitgezet en in hoeverre dit aan/uitschakelgedrag de doorstroming beïnvloedt.

Voor wat betreft volgafstand in stabiel verkeer vertoont het CACC peloton geen bijzonder opvallend gedrag ten opzichte van het reguliere verkeer. Interessant in deze is om vervolgonderzoek te verrichten naar volgtijden kleiner dan 0,6 seconden en bij meer dynamiek in de verkeersstroom. Het is de verwachting dat CACC bij kleinere volgtijden een groter verschil gaat maken dan in de huidige studie.

Simulatieomgeving
De simulatieomgeving bevat enkele beperkingen waardoor de effecten in de praktijk wellicht net iets anders uit kunnen vallen. Dit gaat met name over het rijgedrag van de handmatige bestuurders. In de simulatieomgeving was het niet mogelijk om een vertraging op de reacties van de bestuurders toe te voegen, behalve voor het eerste voertuig dat voor rood licht wacht. De CACC en ACC-voertuigen hebben wel een (kleine) vertraging ('engine delay') bij het reageren op een verandering van de voorligger, ook in de simulaties. Daardoor rijden de handmatige bestuurde voertuigen in de simulatie wellicht iets te efficiënt, en zou de CACC in de praktijk meer winst kunnen laten zien. Wat betreft invoegingen in de simulaties wordt een beperkte set van gedragsregels gevold, die soms leiden tot kritieke situaties. In de praktijk reageren vooral menselijke bestuurders coöperatiever om zulke situaties te voorkomen. Toekomstige ontwikkelingen kunnen erop gericht zijn om ook automatische systemen coöperatiever om te kunnen laten gaan met invoegingen om zo de verkeersveiligheid en het comfort verder te verhogen. Een voorbeeld hiervan is dat de voertuigen in de naastliggende strook waar het CACC voertuig in wil voegen, automatisch ruimte maken en hun snelheid aanpassen aan het invoegende voertuig.

Groenverlenging en kruisende richtingen
Het inzetten van groenverlenging voor de doorstroming leverde bij 100% CACC gemiddeld 11% afname van de reistijd op. Het effect op de totale doorstroming moet nog onderzocht worden. Bij een hoge penetratiegraad van CACC en vaak inzetten van de groenverlenging kan een nadelig neveneffect ontstaan voor het verkeer op de zijrichtingen van de kruising. Doordat dit om minder verkeer ging, is het totale effect in reistijd positief. Echter, in het geval van onacceptabele wachttijden zullen er beleidskeuzes gemaakt moeten worden op het gebied van prioritering.

Automatisch van rijstrook wisselen
TNO werkt momenteel aan oplossingen om automatisch van rijstrook te kunnen wisselen. Het effect hiervan op doorstroming en verkeersveiligheid is een interessant onderwerp voor vervolgonderzoek.

Variatie in autotypes
Zoals vermeld bestond de proef uit 7 vrijwel identieke voertuigen, met daardoor ook gelijkwaardige acceleratie- en remkarakteristieken. Het verschil in acceleratie- en remkarakteristieken zal van belang worden wanneer een peloton van heel verschillende voertuigen, bijvoorbeeld verschillende typen personenauto's en vrachtauto's, door elkaar wordt samengesteld. In dat geval zouden de voertuigen informatie uit kunnen wisselen over de acceleratie- en remeigenschappen via

draadloze communicatie. Een ‘peloton manager’ kan in zo’n geval de pelotons sorteren op langzame en snelle voertuigen. Hierdoor worden de snellere voertuigen niet belemmerd door het trage optrekken van bijvoorbeeld vrachtauto’s.

Prestaties bij slechte weersomstandigheden

Zelfs tijdens extreme buien op de woensdag in de testweek functioneerde de CACC-regeling naar behoren. De test is toen echter wel afgeblazen, omdat er niet meer voldaan werd aan de eisen van de RDW-ontheffing. Hierin is namelijk opgenomen dat we geen enkele test uitvoeren bij, onder andere, een zicht kleiner dan 200 m. Hier ligt echter juist een grote kans voor CACC aangezien het systeem nog net zo goed functioneert tijdens regen, terwijl normale weggebruikers meer afstand zullen houden en anders zullen reageren dan in goede weersomstandigheden. De lagere capaciteit die bij regen optreedt kan door CACC mogelijk voorkomen worden.

Appendix A: De CACC praktijktest

In deze appendix word beknopt de voorbereiding en de uitvoering van de praktijktest op de N205 beschreven. Dit hoofdstuk bestaat uit de beschrijving van het testplan, de testlocatie, techniek, en tot slot een beschrijving van de log data.

A.1 *Testplan*

Om de onderzoeksvragen en de benodigde gegevens voor de doorstromingssimulatie te kunnen verzamelen zal met zeven geïnstrumenteerde voertuigen tijdens een aantal testdagen op het traject op en neer gereden worden. Gegevens met betrekking op de manier waarop het voertuig het peloton vormt en de interactie met de infrastructuur zullen verzameld worden. Tabel A.1 beschrijft de ontworpen test scenario's welke ontstaan zijn uit de combinatie van peloton formatie methode en de mogelijkheid om te interacteren met de infrastructuur.

Tabel A.1 Overzicht test scenario's praktijktest N205

			Interactie met infrastructuur	
		Referentie	Groen herkenning	Peloton herkenning
Peloton formatie	Handmatig	X	X	
	TNO ACC		X	
	TNO CACC		X	X

A.2 *Test locatie*

Te test locatie van de praktijktest is de door de provincie beschikbaar gestelde proeftuin welke is ingericht op de provinciale wegen rond Schiphol. In deze proeftuin bevinden zich op de N205 een zestal kruispunten die zijn uitgerust met slimme verkeerslichten (iVRI's). Dat betekent dat de verkeerslichten de voertuigen bijvoorbeeld kunnen informeren over de "tijd tot groen" (TTG: dit is het aantal seconden alvorens het verkeerslicht op groen zal gaan) en "groenherkenning" (dat is de applicatie in het voertuig welke op basis van een VRI bericht de status van het verkeerslicht weet).

Tevens is een deel van dit tracé, Figuur A.2, met vier intelligente verkeerslichten interessant omdat verschillende situaties optreden die sterke invloed hebben op de interactie tussen verschillende voertuigen en weggebruikers en daarmee de doorstroming en veiligheid beïnvloeden:

- **Kruising 1**: N205 - N232 aansluiting
  Hier is geen langzaam verkeer.

- **Kruising 2**: N205 – Vijfhuizerweg (Figuur A.2)
  De doorgaande weg gaat van 3 naar 2 rijstroken ook zijn er bij dit kruispunt fietsers.

- **Kruising 3**: N205 - Verbindingsweg N201
  De doorgaande weg blijft 2 rijstroken

- **Kruising 4**: N205 - Nieuwe Bennebroekerweg.
  In zuidelijke richting gaat de weg in van 2 naar 1 rijstrook. In noordelijke richting blijft deze 2 rijstroken.



Figuur A.1, Vloot testauto's ten tijde van de proef op de N205 nabij kruising 2, Vijhuizerweg



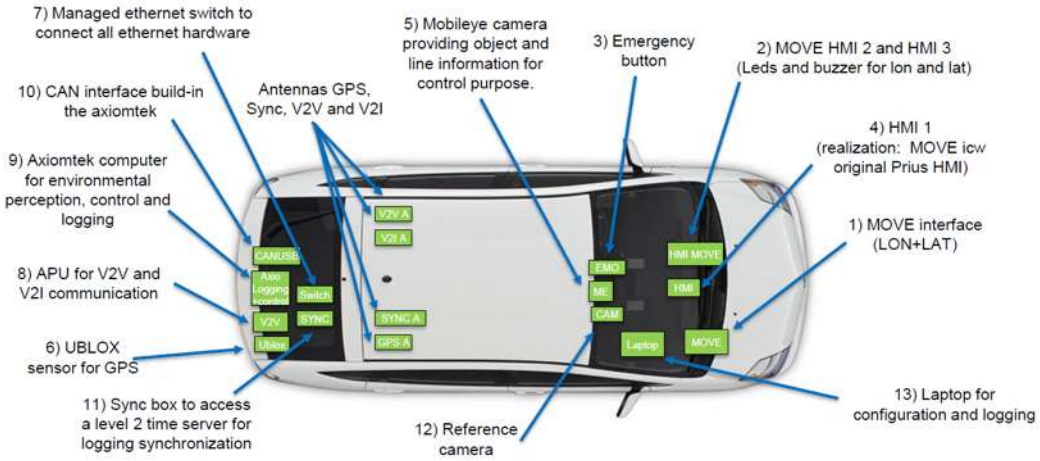
Figuur A.2, Test traject N205 met daarin aangegeven het traject waarop getest gaat worden (oranje traject), de verkeerslichten (rood) en de start en eind punten van de test (blauw). In groen zijn de keerpunten voor het voertuig peloton aangegeven. Het oranje markeerpunt geeft de beoogde uitvalsbasis aan.

A.3 *Techniek*

Om de praktijktest uit te kunnen voeren heeft TNO gebruikt gemaakt van zeven Toyota Prii die door verschillende onderzoeksinstituten beschikbaar zijn gesteld voor het onderzoek.

De hardware configuratie, zoals te zien in Figuur A.3, is in alle testvoertuigen ingebouwd. Zo bevatten alle testvoertuigen een zogenaamde Axiomtek computer welke door middel van de door TNO ontwikkelde MOVE-box veilig aan het voertuignetwerk van een Prius kan worden verbonden. Doormiddel van deze MOVE-box kunnen voertuigsignalen, camera beelden en radar data afgetapt worden van het voertuig en gebruikt worden in de TNO ACC en CACC regelkring.

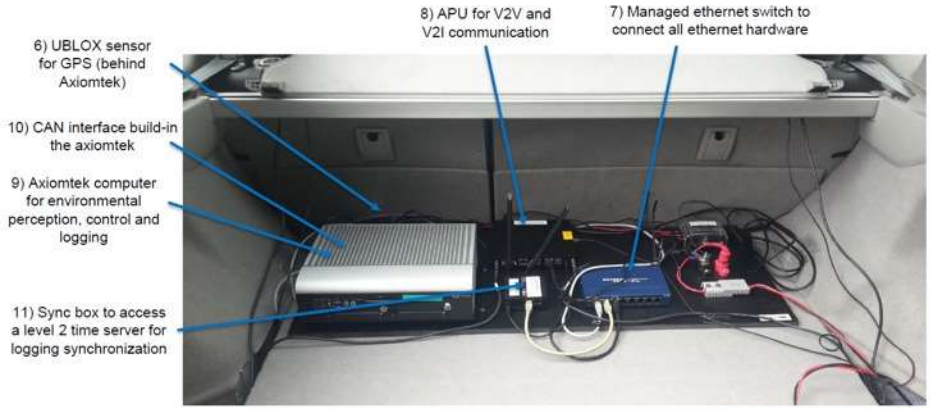
Ten behoeve van de 'Connected' component in CACC bevatten alle voertuigen een Wi-Fi communicatie module welke de voertuigen in staat stellen om regeltechnische informatie met elkaar te delen. Daarnaast is er in ieder voertuig een 4G internet verbinding aanwezig waarmee een operator vanaf afstand, draadloos en live mee kan kijken in de software en voertuigdata. Ook kan de operator hiermee op afstand de logging voor ieder voertuig starten of stoppen.



Figuur A.3, Hardware configuratie testvoertuigen N205

De hardware configuratie is vervolgens op compacte wijze in de testvoertuigen ingebouwd zoals te zien in Figuur A.4.

Tijdens de testen wisselen de testvoertuigen informatie uit met de iVRI's. Afhankelijk van het testscenario gebruiken de iVRI's deze informatie vervolgens voor peloton herkenning en prioriteitsverlening aan het peloton. De vanuit de iVRI afkomstige tijd-tot-groen informatie is tevens opgevangen in het testvoertuig en gevisualiseerd voor de bestuurder door middel van een Android App. Ook worden voor ieder voertuig de iVRI berichten op gesynchroniseerde wijze gelogd tezamen met de voertuig data.



Figuur A.4, Instrumentatie in kofferbak testvoertuig N205

Om de benodigde hardware en software te gebruiken voor testen op de openbare weg is een ontheffing vereist. Een ontheffing kan alleen verkregen worden als veiligheid gewaarborgd kan worden. Hiervoor worden systemen getest in simulatie en testbanen en hebben de bestuurders een rijopleiding gevolgd. Bovendien valideert RDW dat het systeem naar behoren werkt en veiligheid gewaarborgd is. Hiervoor zijn op de RDW proefbaan in Lelystad demonstraties en stress-testen uitgevoerd met de testvoertuigen, Figuur A.5.



Figuur A.5, Vloot van geïnstrumenteerde testvoertuigen op RDW proefbaan Lelystad

A.4 *Logdata*

TNO maakt gebruik van ROS middleware om alle systemen zoals sensoren, regelcomputers, communicatie, logging en actuatoren in het testvoertuig met elkaar te verbinden.

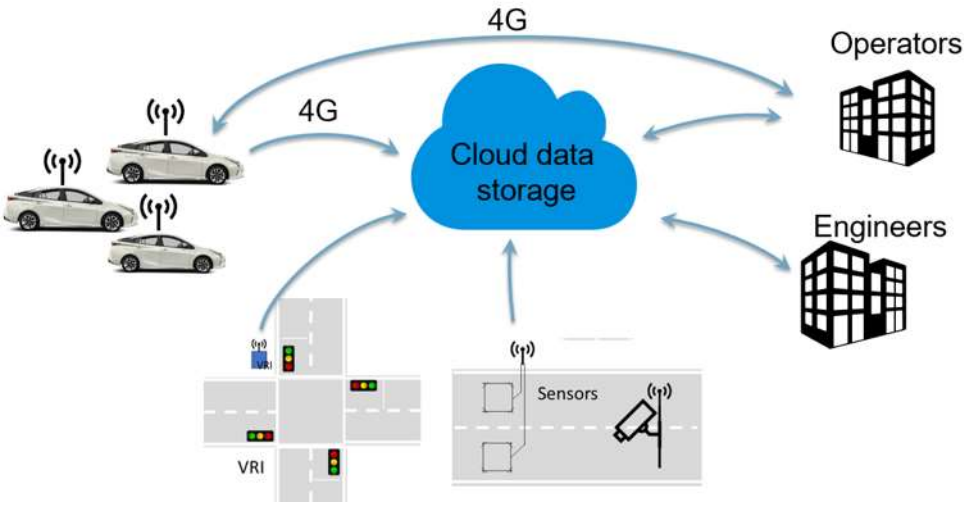
Zodra de testvoertuigen aangezet worden zal ook de ROS middleware opgestart worden. TNO heeft de keuze om de testvoertuigen direct alle beschikbare signalen te laten loggen of om op gespecificeerde momenten de logging te starten. In het kader van data acquisitie van specifieke testen zoals uitgevoerd tijdens de proefweek in Noord-Holland is voor de tweede optie gekozen. Hiervoor was een controlekamer

ingericht op de uitvalsbasis die draadloos verbonden was met het ROS netwerk in de auto's. Doordat ook deze controlemaker verbonden is met het ROS netwerk kan de operator live met de data mee kijken en zodoende beoordelen of de correcte signalen beschikbaar zijn in de logging. Indien er een probleem met de log data zou zijn kon de operator dit kenbaar maken aan de testrijders en het probleem oplossen vanuit de controlekamer. Door middel van de 4G verbinding tussen control-room en testvoertuigen is het mogelijk om de logging voor alle voertuigen gelijktijdig te starten.

De meetdata wordt in eerste instantie opgeslagen op een harde schijf in het voertuig. Vervolgens kan deze data direct worden geüpload naar een cloud data opslag server. In Figuur A.6 is de logging architectuur weergegeven.

Ook kan via een communicatienetwerk logdata van de wegkant toegevoegd worden aan de dataset van de voertuigen. Dit is onder andere de verkeerslichten status en TTG, camerabeeld en detectielus informatie.

De cloud data server kan ook bereikt worden door ingenieurs. Deze kunnen de ruwe data na-bewerken en kunnen vervolgens de data gebruiken voor onderzoek en het analyseren van de prestatie van de regelingen (ACC en CACC) en verkeerseffecten.



Figuur A.6, Logging toolchain TNO zoals gebruikt tijdens de praktijktest.

Appendix B: Opzet bestuurdersonderzoek

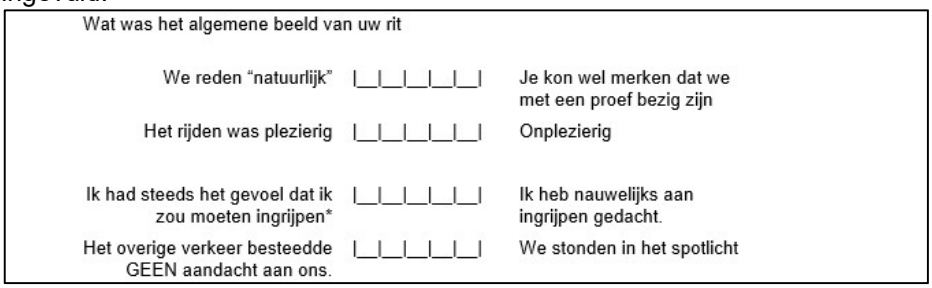
In deze appendix word beknopt de opzet van de het bestuurdersonderzoek tijdens de praktijktest op de N205 beschreven.

B.1 ***Opzet***

Het ontwerp van het deze bestuurderservaringen enquête is pragmatisch opgezet. Er zijn bijvoorbeeld geen bewuste keuzes gemaakt in rijdersvolgorde, rijderspositievariatie en rijtijden. Om de hypothese te kunnen toetsen is per bestuurder gekeken naar de bestuurderservaring op basis van:

- Rijplezier
- Natuurlijk rijgedrag
- De noodzaak tot ingrijpen
- De aandacht van het overig verkeer

De bestuurders is gevraagd om een cijfer van één tot vijf te geven voor de vier onderwerpen. De vragenlijst is weergegeven in Figuur B.1 en in totaal circa 120 keer ingevuld.



Figuur B.1, Vragenlijst bestuurders testvoertuigen.

Daarnaast is er gekeken naar een aanvullende overkoepelende parameter met betrekking tot de pelotonpositie en -grootte.

B.2 ***Resultaten en conclusies***

De data uit de vragenlijsten is geanalyseerd met behulp van variatie-analyse. De gemiddelde score is in figuur 2-4 t/m 2-7 aangegeven met een cirkel en de variatie tussen bestuurders in de scenario's is aangegeven met de verticale rode lijn. Er zijn 6 metingen met handmatig rijden, 4 met ACC en 7 met de CACC regeling verricht. In deze paragraaf is onderscheid gemaakt tussen (1) de bestuurderservaring, (2) de pelotonpositie en -grootte en (3) overige observaties.

B.2.1 Bestuurderservaring

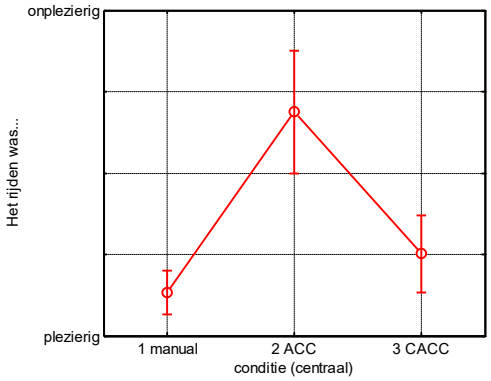
Overkoepelend zijn de resultaten van alle bestuurderservaring eenduidig:

- Handmatig rijden is gemiddeld het meest plezierig en voelt het meest natuurlijk.
- ACC voelt gemiddeld het minst plezierig, het voelt als een proef en er moet relatief vaak worden ingegrepen door de bestuurder.

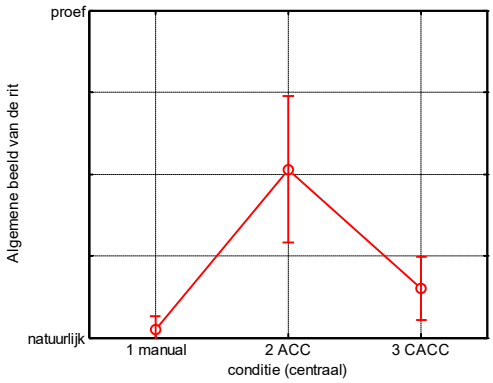
- Het rijden met CACC wordt op alle aspecten prettiger gevonden dan rijden met ACC. Het verschil in rijplezier tussen zelfstandig rijden en rijden met CACC is niet significant.

Hiermee kan de eerste hypothese worden verworpen maar is de tweede hypothese niet te bevestigen noch te verwerpen.

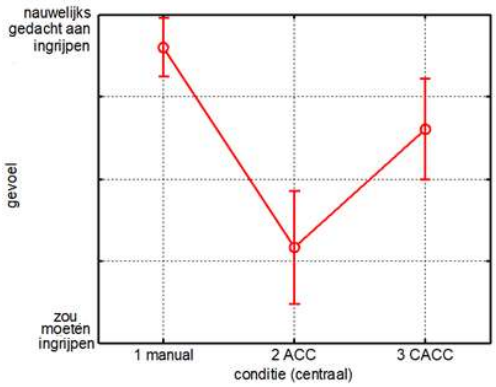
In Figuur B.2 tot Figuur B.4 zijn de resultaten weergeven voor rijplezier, natuurlijk rijgedrag en noodzaak tot ingrijpen weergegeven.



Figuur B.2, Rijplezier voor de manueel, ACC en CACC regelkringen.



Figuur B.3, Algemeen beeld van de proef voor de manueel, ACC en CACC regelkringen.



Figuur B.4, Gevoel tot ingrijpen voor de manueel, ACC en CACC regelkringen.

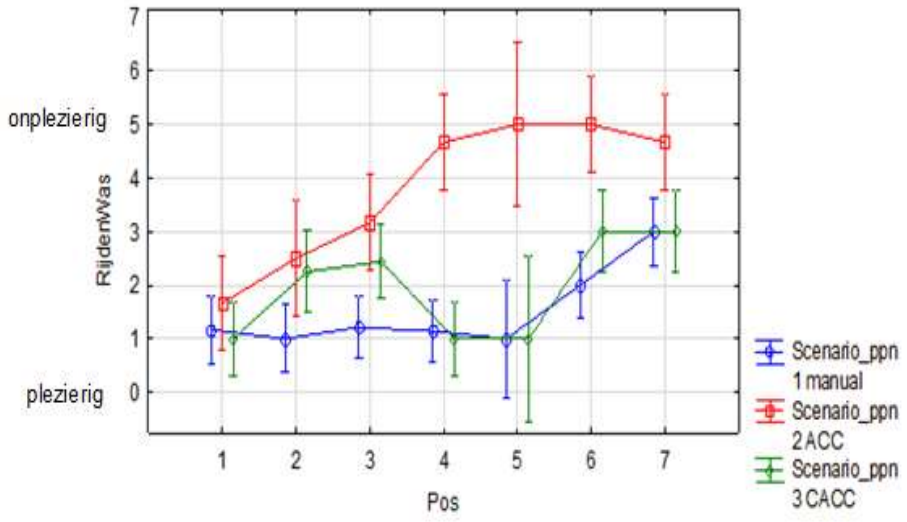
Met deze resultaten kunnen de twee hypothesen worden getoetst.
De eerst hypothese die stelt dat het *rijden* met ACC als prettiger wordt ervaren dan handmatig rijden kan worden verworpen. Het rijden met ACC wordt op alle aspecten als minder plezierig ervaren.
De tweede hypothese die stelt dat het *coöperatief automatisch* rijden met CACC als prettiger wordt ervaren dan handmatig rijden kan ook niet worden bevestigd, gezien er geen significant verschil gemeten is in rijplezier. Resultaten laten zien dat het rijden met CACC minder natuurlijk aanvoelt en dat de noodzaak tot ingrijpen meer aanwezig is dan bij handmatig rijden. Dit is logischerwijs te verwachten bij het testen van innovatieve automatisch rijdende systemen. De afname van het rijplezier is niet statistisch significant.

B.2.2 Pelotonpositie en -grootte

Uit de resultaten is op te maken dat het rijplezier sterk afhankelijk is van de positie in het peloton. Deze relatie hangt niet samen met het handmatig rijden of met rijden met ACC en CACC.

Een pelotongrootte van zeven voertuigen trekt meer aandacht dan een peloton van drie voertuigen maar zorgt niet voor merkbaar ander rijgedrag van andere weggebruikers.

In Figuur B.5 is te zien dat rijplezier sterk afhankelijk is van de positie in het peloton. Wanneer men zich verder achterin het peloton bevindt gaat het rijplezier omlaag voor alle drie de soorten ondersteuning. In een ACC-peloton wordt vanaf positie vier en verder de rijervaring beoordeeld als meest onplezierig. In de pelotons waar handmatig werd gereden of met CACC wordt geen vergelijkbaar onplezierigheidsniveau bereikt. In beide pelotons wordt positie zeven (de achterste bestuurder van het peloton) voor handmatig (manueel) en CACC relatief als minder plezierig ervaren.



Figuur B.5, Rijplezier voor de manueel, ACC en CACC regelkringen tegen de positie in het peloton.

Met betrekking tot de aandacht van het overig verkeer maakt het onderscheid naar handmatig rijden, ACC en CACC geen verschil omdat dit voor het overige verkeer niet zichtbaar is vanaf de buitenkant. Daarom is hierbij onderscheid gemaakt naar de pelotongrootte. Bij 3 voertuigen werd opgemerkt door de bestuurders dat het overig verkeer wel opmerkte dat de drie identieke voertuigen met elkaar te maken hadden, maar er werd geen merkbaar ander rijgedrag opgemerkt. Bij een pelotongrootte van 7 voertuigen werd hetzelfde resultaat gevonden. Overig verkeer lijkt in grotere mate op te merken dat de zeven identieke voertuigen met elkaar te maken hebben maar dit veroorzaakt geen merkbaar ander gedrag. Naar verwachting komt dit door het aantal identieke voertuigen in het peloton en niet door het gedrag van het peloton. Alle voertuigen waren immers van hetzelfde merk en type en hebben soortgelijke bestickering.

Appendix C: Opzet simulatiestudie

C.1 ***Algemene aanpak***

De simulatiestudie is uitgevoerd met het microsimulatiemodel Vissim van PTV, aangevuld met een 'extern voertuigmodel' van TNO, dat het gedrag van de ACC en CACC-voertuigen modelleert. De onderzoekshypothesen, de gekozen scenario's, het netwerk, de verkeersregelingen en het verkeersgedrag van zowel de 'normale' bestuurders als van de ACC en CACC-voertuigen zullen in deze bijlage verder worden toegelicht.

C.1.1 Onderzoekshypothesen

Voorafgaand aan de simulatiestudie zijn een aantal hypothesen opgesteld die we met de simulaties hebben getoetst, op het gebied van doorstroming en veiligheid.

Doorstroming:
Optrekken bij verkeerslicht – uitgeruste voertuigen in aaneengesloten peloton:

1. De reactietijd van ACC-voertuigen is korter dan van mensen waardoor er meer voertuigen door een groenfase met dezelfde duur kunnen.
2. Doordat CACC-voertuigen allemaal 'tegelijk' optrekken, gaan er meer CACC-voertuigen door een groenfase met dezelfde duur dan ACC-voertuigen.
3. Hoe groter de pelotonlengte, hoe groter het voordeel. Uitgangspunt hierbij is dat alle voertuigen uit het peloton worden doorgelaten in dezelfde groenfase.
    a) Groenherkenning heeft een klein positief effect op de doorstroming omdat de reactietijd van het voorste voertuig korter is
4. Bij groenverlenging zal er betere doorstroming zijn op de doorgaande richting, en een verslechtering van de doorstroming op de kruisende richtingen.

Verkeerslicht naderen:

5. ACC en CACC-pelotons kunnen onderbroken worden door rood licht, zodat pelotons na een verkeerslicht korter van lengte zijn dan voor een rood licht.

Tussen verkeerslichten:

6. In een deel van de ritten zal het peloton van ACC- of CACC-voertuigen worden opgesplitst door invoegers.
7. Bij lage penetratiegraden is het lastig om een nieuw peloton te vormen van meer dan 2 voertuigen als het wordt opgesplitst.
8. Door de aanwezigheid van CACC pelotons komen voertuigen meer gegroepeerd bij verkeerslichten aan (potentie voor meer groene golven).

Veiligheid:

9. Als gevolg van ACC en CACC zijn er minder (bijna) kopstaartbotsingen.
10. Als gevolg van ACC en CACC verlopen gedwongen rijstrookwisselingen van het overig verkeer veiliger (minder bijna botsingen)

Deze hypothesen zijn getoetst aan de hand van de simulatieresultaten. De output variabelen zijn dusdanig gekozen dat de hypothesen beantwoord kunnen worden.

Vanuit de simulatieresultaten zijn de hypothesen als volgt beantwoord:

1. De reactietijd van ACC-voertuigen is korter dan van mensen waardoor er meer voertuigen door een groenfase met dezelfde duur kunnen.
   Hypothese 1 blijkt uit de simulatieresultaten niet waar te zijn. De reactietijd van het eerste voertuig is weliswaar korter, maar de voertuigen trekken langzamer op waardoor er minder voertuigen door een groenfase met dezelfde duur kunnen.

2. Doordat CACC-voertuigen allemaal 'tegelijk' optrekken, gaan er meer CACC-voertuigen door een groenfase met dezelfde duur dan ACC-voertuigen.
   Deze hypothese is bevestigd vanuit de simulatieresultaten.

3. Hoe groter de pelotonlengte, hoe groter het voordeel. Uitgangspunt hierbij is dat alle voertuigen uit het peloton worden doorgelaten in dezelfde groenfase.
   a) Groenherkenning heeft een klein positief effect op de doorstroming omdat de reactietijd van het voorste voertuig korter is

   Deze hypothese is ook bevestigd vanuit de simulatieresultaten. 100% CACC heeft de langste pelotons en ook het grootste aantal voertuigen dat wordt doorgelaten in een groenfase van dezelfde duur. Groenherkenning heeft een positief effect, wat te zien is door de referentie met groenherkenning te vergelijken met de normale referentie.

4. Bij groenverlenging zal er betere doorstroming zijn op de doorgaande richting, en een verslechtering van de doorstroming op de kruisende richtingen.
   In de simulatieresultaten is inderdaad te zien dat de reistijden op de doorgaande richting korter worden bij groenverlenging, en langer op de kruisende richtingen.

5. ACC en CACC-pelotons kunnen onderbroken worden door rood licht, zodat pelotons na een verkeerslicht korter van lengte zijn dan voor een rood licht.
   Deze hypothese is op grond van de simulatieresultaten en op basis van bovenstaande redenatie niet waar. Er kunnen wel pelotons opgebroken worden, maar uit de simulaties is gebleken dat het effect van het vormen van nieuwe pelotons of samenvoegen van pelotons groter is. Ze zijn daardoor na het verkeerslicht gemiddeld langer van lengte.

6. In een deel van de ritten zal het peloton van ACC- of CACC-voertuigen worden opgesplitst door invoegers.
   Uit de simulaties is gebleken dat deze hypothese waar is.

7. Bij lage penetratiegraden is het lastig om een nieuw peloton te vormen van meer dan 2 voertuigen als het wordt opgesplitst.
   *Deze hypothese is op grond van de simulatieresultaten lastig te beantwoorden. Het vormen van pelotons bij lage verkeerdrukte lijkt mee te vallen. Immers, bij lage verkeersdrukte en bij een invoeging van drie naar twee rijstroken blijft het aantal pelotons en de gemiddelde pelotonlengte ongeveer gelijk, zoals we kunnen zien in Figuur E.*18 *en Figuur E.*19 *van appendix D, terwijl het aantal pelotons (met een minimale lengte van twee*

*voertuigen) bij een invoeging van twee naar een strook zelfs toeneemt (Figuur E.*15*).*

8. Door de aanwezigheid van CACC pelotons komen voertuigen meer gegroepeerd bij verkeerslichten aan (potentie voor meer groene golven).
   Deze hypothese is op grond van de simulatieresultaten bevestigd.

9. Als gevolg van ACC en CACC zijn er minder (bijna) kopstaartbotsingen.
   Deze hypothese is op grond van de simulatieresultaten niet bevestigd. Dit kan getoetst worden aan de hand van het aandeel sterke remacties en kritische time-to-collisions. Dit is alleen onderzocht bij invoegsituaties. Hier lieten de scenario's met ACC en CACC juist een groter aandeel sterke remacties zien. Wel is het mogelijk dat bij het remmen bij verkeerslichten er juist een kleiner aandeel sterke remacties zou zijn dankzij ACC en CACC, maar dit kon niet afgeleid worden uit de simulatiedata, omdat er bij het aanrijden op verkeerslichten overgeschakeld moest worden naar manueel rijden in verband met het afremmen voor rood licht.

10. Als gevolg van ACC en CACC verlopen gedwongen rijstrookwisselingen van het overig verkeer veiliger (minder bijna botsingen)
    Deze hypothese is op grond van de simulatieresultaten niet bevestigd. Dit is getoetst aan de hand van het aandeel sterke remacties en kritische time-to-collisions bij gedwongen rijstrookwisselingen. Hier lieten de scenario's met ACC en CACC juist een groter aandeel sterke remacties zien.

C.2 *Scenario's*

De simulatiestudie is opgezet rondom een aantal vooraf gedefinieerde scenario's, die zoveel mogelijk situaties afdekken die relevant zijn voor het bepalen van de verwachte effecten bij grootschalige invoering van CACC. Het gaat hierbij om scenario's voor zowel de nabije als de verre toekomst. In de nabije toekomst kan gedacht worden aan een penetratiegraad van 10%, terwijl 100% een scenario weerspiegeld in de verre toekomst om de potentie van het systeem te kunnen bepalen.
De scenario's staan weergegeven in Tabel C.1. In deze scenario's is de penetratiegraad het percentage voertuigen dat uitgerust is met ACC dan wel CACC ten opzichte van het totaal aantal personenvoertuigen. Hier bovenop bevatten de simulaties ook vrachtverkeer. Het percentage vrachtverkeer is (per input locatie) afgeleid van meetdata van de provincie. Dit percentage ligt rond de 6%.
De scenario's zijn meerdere keren gesimuleerd, zodat de resultaten statistisch betrouwbaar zijn.

Tabel C.1 scenario's van de simulatiestudie

	Hoog drukteniveau				**Laag drukteniveau**			
	Penetratiegraad				Penetratiegraad			
	0%	10%	50%	100%	0%	10%	50%	100%

Referentie	x				x			
Referentie met groenherkenning				x				x
ACC met groenherkenning		x	x	x		x	x	x
CACC met groenherkenning		x	x	x		x	x	x
CACC met groenherkenning en groenverlenging		x	x	x		x	x	x

Het hoge drukteniveau is afgeleid van een gemiddelde ochtendspits tijdens een werkdag van 7:35 – 9:00, op basis van VLOG-data uit de verkeersregelinstallaties. Omdat de gemiddelde ochtendspits op de N205 nog vrij rustig is, is ervoor gekozen om de huidige verkeersvraag op te hogen, zodat de potentie van de CACC bij een grote verkeersdrukte bepaald kan worden. Dit is als volgt gedaan:

- De hoeveelheid verkeer op de N205 die binnenkomt op het zuidelijkste punt van het netwerk richting het noorden is opgehoogd met 50%.
- De hoeveelheid verkeer op de N205 die binnenkomt op het noordelijkste punt richting het zuiden is opgehoogd met 20%. (Vanuit de noordelijke richting begint de N205 met heel veel rijstroken, maar eindigt met slechts 1 rijstrook, daarom kon deze richting minder opgehoogd worden.)
- Het percentage afslaand verkeer vanuit het zuiden naar de N201 is verlaagd van 37% naar 10% om terugslagfiles vanuit de richting van de N201 te voorkomen.
- Het percentage afslaand verkeer vanuit het noorden naar de N201 is verlaagd van 35% naar 20% om terugslagfiles vanuit de richting van de N201 te voorkomen.

Het lage drukteniveau is afgeleid uit de VLOG-data van de periode 10:00 - 12:00 op een gemiddelde werkdag voor de N205. Voor de N201 waren hier geen meetgegevens van beschikbaar en is 66% van de verkeersvraag van de ochtendspits genomen.

Het referentiescenario bevat alleen ‘normale’ voertuigen zoals deze momenteel op de weg rijden: de bestuurder bestuurt het voertuig zonder gebruik te maken van ondersteunende systemen.

In het scenario ‘Referentie met groenherkenning’ wordt verondersteld dat als een voertuig het eerste voertuig is dat stil staat voor een rood verkeerslicht, de bestuurder informatie krijgt over de resterende tijd tot het verkeerslicht op groen zal gaan. Vervolgens wordt aangenomen dat de reactietijd tot het eerste voertuig begint te rijden, hierdoor afneemt. In dit scenario is deze reactietijd gemodelleerd als een verdeling met een gemiddelde van 0.8 seconden en een standaard afwijking van 0.1 seconden. In het referentiescenario (zonder groenherkenning) is het gemiddelde 1.2 seconden met standaard afwijking van 0.5 seconden. De reactietijd zonder groenherkenning is gebaseerd op een analyse van de camerabeelden van de N205.

De reactietijd met groenherkenning is een expert judgement, waarbij ook is gekeken naar relevante wetenschappelijke papers ([Zhenlong Li, 2014] [Zhenlong Li, 2015]), die echter gebaseerd waren op meetdata uit China en daarom niet toepasbaar op de Nederlandse situatie.

In de scenario's 'ACC met groenherkenning' is een deel van het verkeer uitgerust met ACC. Er wordt ook verondersteld dat het ACC-voertuig informatie krijgt over wanneer het verkeerslicht groen zal worden. Het voertuig heeft dan een vertraging van 0.2 seconden tot het zal optrekken.

In de scenario's 'CACC met groenherkenning' is een deel van het verkeer uitgerust met CACC. Er wordt ook verondersteld dat de CACC-voertuigen informatie krijgen over wanneer het verkeerslicht groen zal worden. Het voertuig heeft dan (net als de ACC-voertuigen in de ACC scenario's) een vertraging van 0.2 seconden tot het zal optrekken.

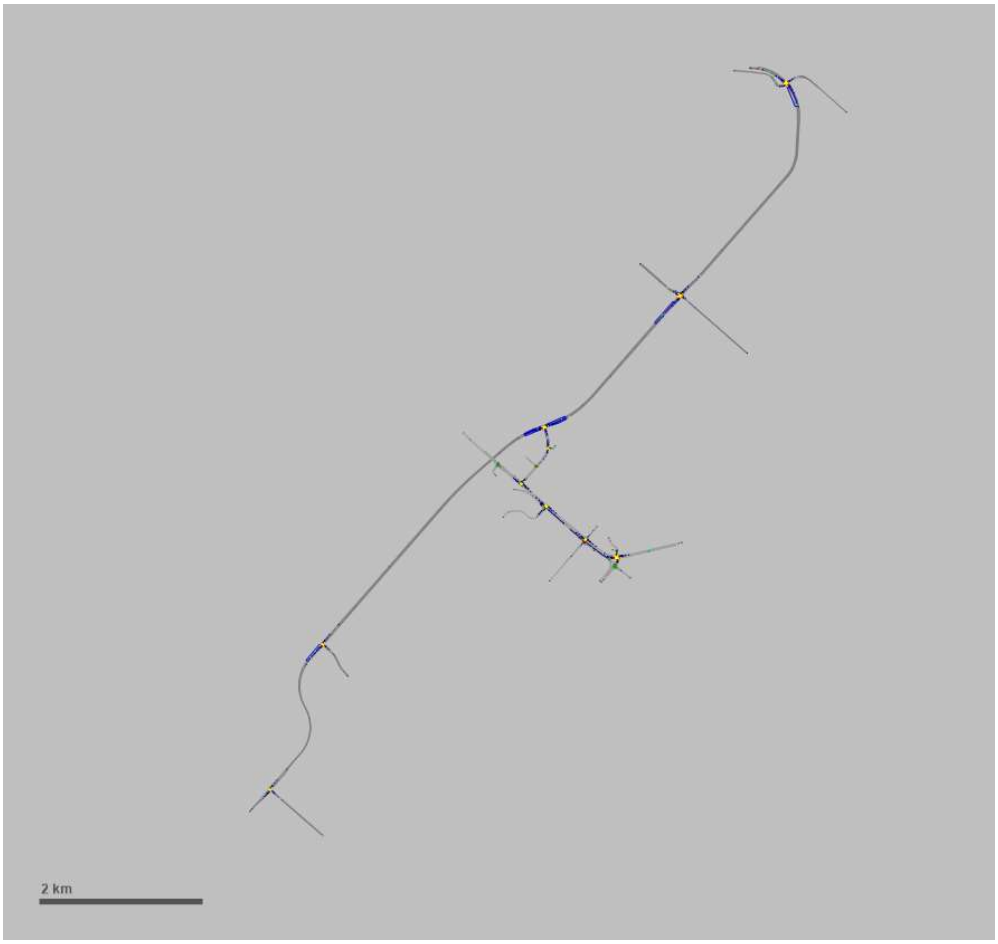
Tenslotte is er in de scenario's 'CACC met groenherkenning en groenverlenging' een variant van de VRI regelingen geïmplementeerd, waarbij de groenfase verlengd wordt indien er een peloton van 5 opeenvolgende CACC-voertuigen wordt gedetecteerd op een afstand 300 meter stroomopwaarts van de kruising. Zie paragraaf C.4 voor meer details.

C.3 *Vissim netwerk*

Het netwerk van de simulatiestudie is gelijk aan het netwerk waar de praktijktest is uitgevoerd, namelijk een deel van de N205 en van de N201, zoals weergegeven in Figuur C.1. De geometrie, snelheidslimieten en de VRI regelingen zijn exact overgenomen zoals deze in werkelijkheid zijn. In totaal bevat het netwerk 11 kruisingen.

Voor de analyse is de N205 het meest van belang. Deze bevat vijf relevante kruispunten:

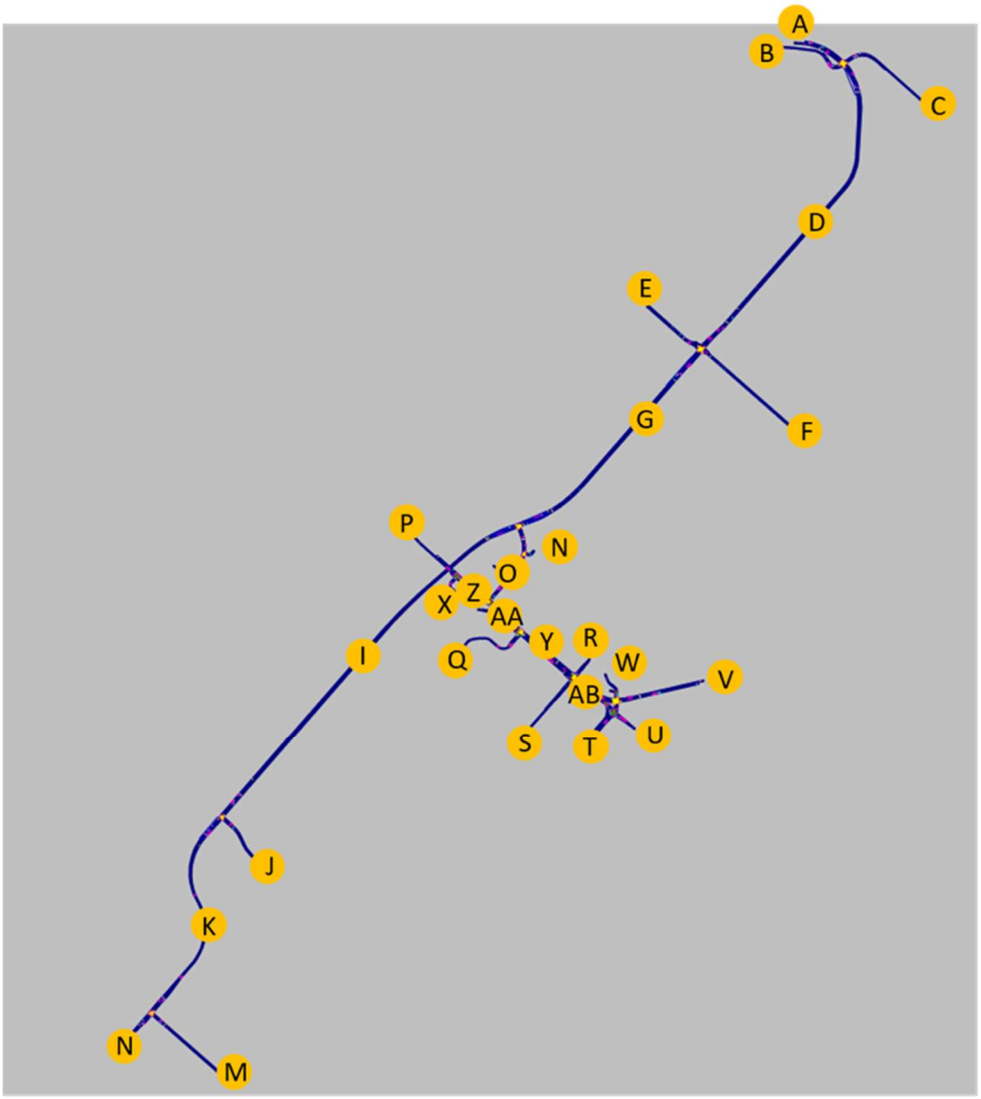
- N205 – Noordelijke randweg. Na de kruising gat de weg van 2 naar 1 rijstrook. T-splitsing;
- N205 - Nieuwe Bennebroekerweg. Ook hier gaat de weg van 2 naar 1 rijstrook, T-splitsing;
- N205 - Verbindingsweg N201. De weg blijft 2x 2rijstroken. T-splitsing;
- N205 - Vijfhuizerweg. De weg gaat van 3 naar 2 rijstroken – ook zijn er bij dit kruispunt fietsers;
- N205 - N232 aansluiting. Hier is geen langzaam verkeer.



Figuur C.1 het gesimuleerde netwerk in Vissim

Het deel van het netwerk van de N201 is aangeleverd door de provincie Noord-Holland, inclusief de verkeersvraag voor een ochtendspits. Beide netwerken zijn in Vissim aan elkaar gekoppeld en de hoeveelheid verkeer op het koppelpunt is met elkaar vergeleken. Dit bleek al goed te matchen.

De verkeersvraag van de N205 is afgeleid uit de VLOG data van de verkeersregelinstallaties van 23 mei 2018 t/m 5 juni 2018. De verkeersvraag is ingevoerd door middel van instroomhoeveelheden (‘vehicle inputs’ in Vissim) bij elke ingang van het netwerk, gedefinieerd per kwartier, en splitfracties bij elke kruising. De vehicle inputs behorende bij het schematische netwerk in Figuur C.2 zijn weergegeven in Tabel C.6, de splitfracties in Tabel C.3. Voor de drukke periode zijn de intensiteiten op de N205 opgehoogd om een voldoende druk netwerk te creëren om het effect van de CACC in druk verkeer te kunnen testen, zoals uitgelegd in Paragraaf C.2. De bijbehorende vehicle inputs staan in Tabel C.2.



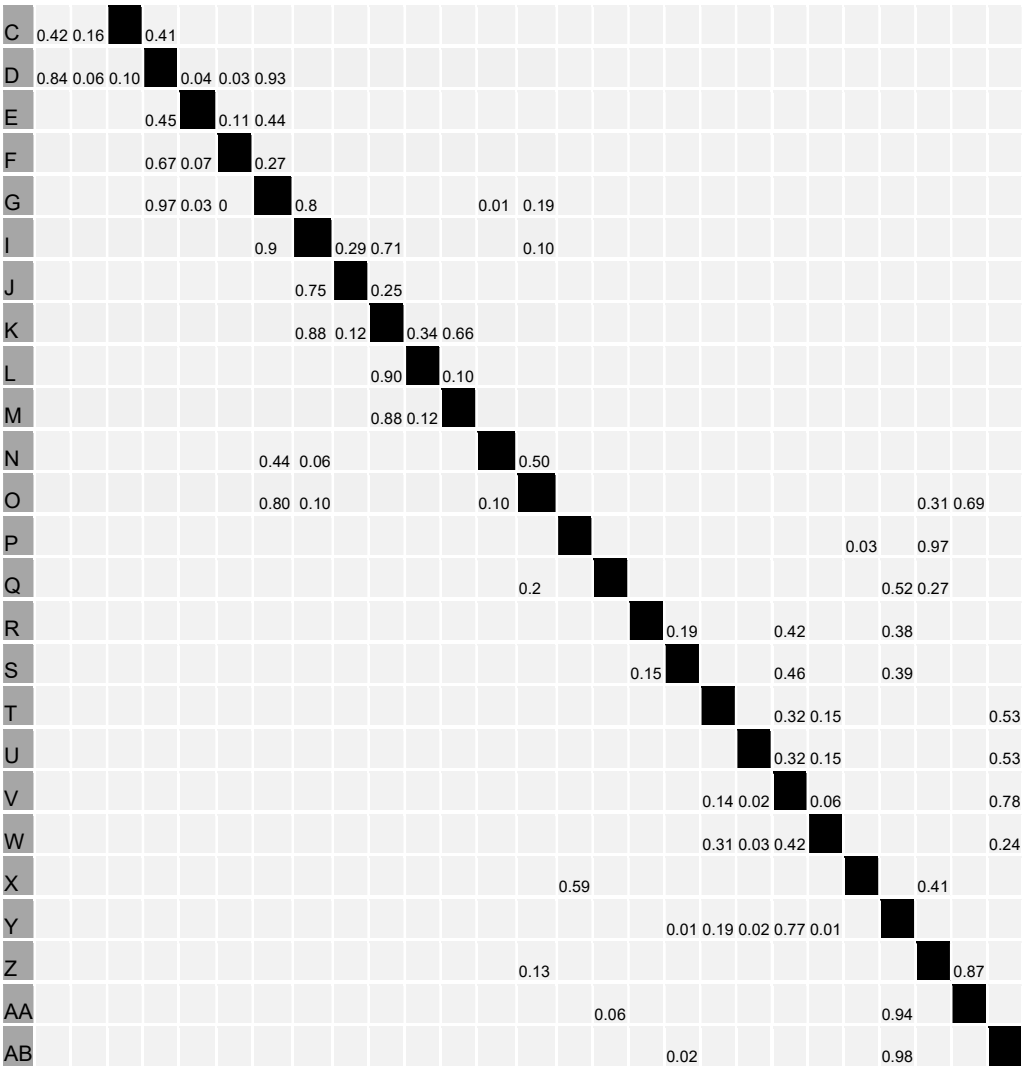
Figuur C.2 schema van het netwerk corresponderend met de tabellen over vehicle inputs en splitfracties

Tabel C.2 'Vehicle inputs' ochtendspits 7:30 – 9:00 drukteniveau 1 (opgehoogd)

Eindtijd	A	B	C	E	F	J	L	M	N	O
07:45	1656	692	244	296	48	918	568	1089	8	1294
08:00	1747	728	288	264	40	918	638	1098	20	1290
08:15	1550	732	320	292	56	946	672	1113	18	1290
08:30	1757	772	288	324	60	952	508	1041	14	1418
08:45	1670	704	312	316	44	616	418	837	14	1036
09:00	1445	596	272	208	44	560	342	870	14	796

Tabel C.3 splitfracties ochtendspits 7:30 – 9:00 drukteniveau 1 (opgehoogd)

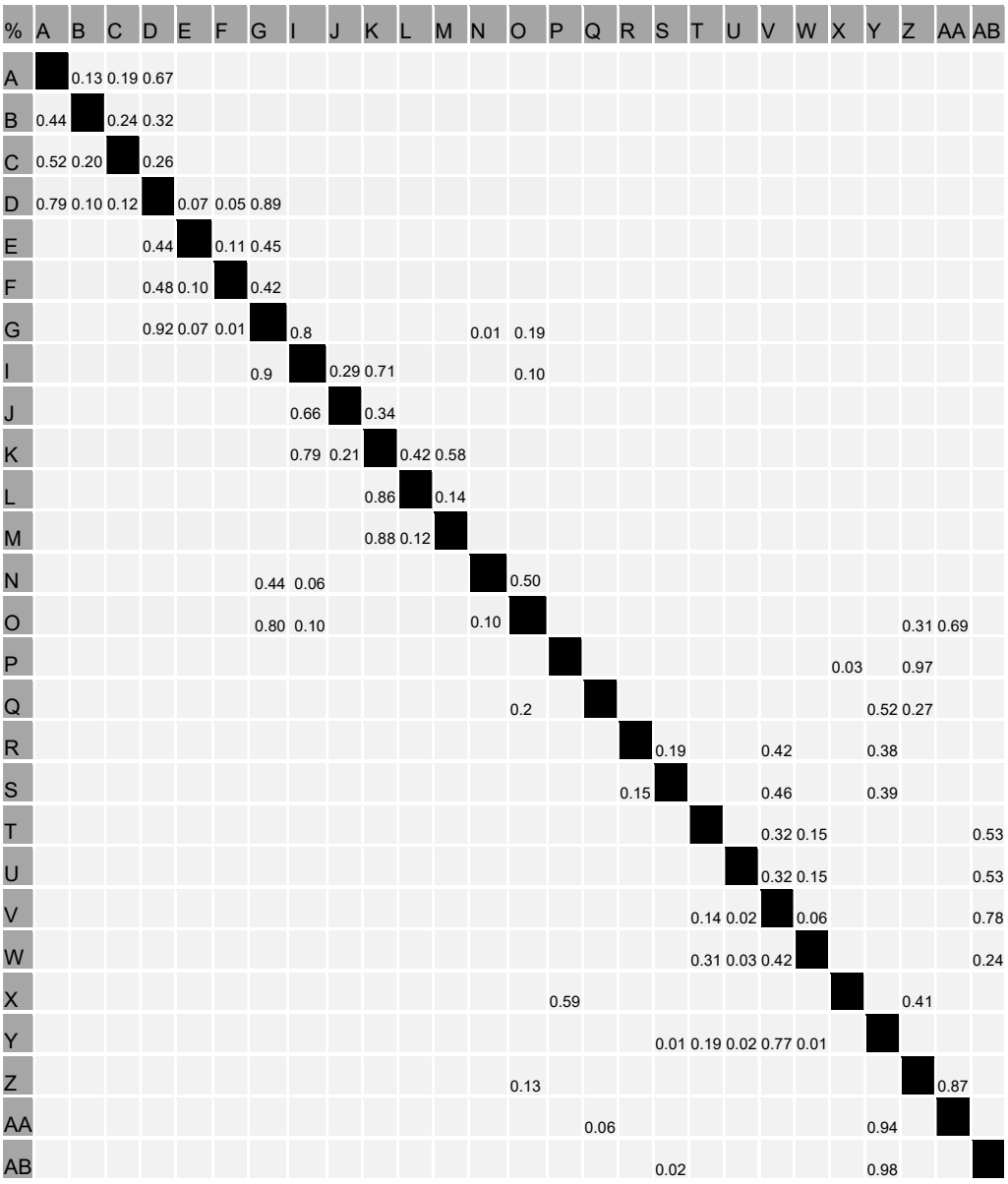
%	A	B	C	D	E	F	G	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB
A		0.09	0.13	0.78																							
B	0.51		0.23	0.26																							



Tabel C.4 ‘Vehicle inputs’ restdag 10:30 – 12:00

	A	B	C	E	F	N	J	L	M
10:30	1656	692	244	296	48	8	918	568	1089
10:45	1747.2	728	288	264	40	20	918	638	1098
11:00	1550.4	732	320	292	56	18	946	672	1113
11:15	1756.8	772	288	324	60	14	952	508	1041
11:30	1670.4	704	312	316	44	14	616	418	837
11:45	1444.8	596	272	208	44	14	560	342	870
12:00	1656	692	244	296	48	8	918	568	1089

Tabel C.5 splitfracties restdag 10:30 – 12:00



Tabel C.6 ‘Vehicle inputs’ ochtendspits 7:30 – 9:00 (niet opgehoogd)

	A	B	C	E	F	N	J	L	M
07:30	1380	692	244	296	48	8	918	568	726
07:45	1456	728	288	264	40	20	918	638	732
08:00	1292	732	320	292	56	18	946	672	742
08:15	1464	772	288	324	60	14	952	508	694
08:30	1392	704	312	316	44	14	616	418	558
08:45	1204	596	272	208	44	14	560	342	580
09:00	1380	692	244	296	48	8	918	568	726

Tabel C.7 splitfracties ochtendspits 7:30 – 9:00 drukteniveau 1 (niet opgehoogd)

%	A	B	C	D	E	F	G	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB
A		0.09	0.13	0.78																							
B	0.51		0.23	0.26																							
C	0.42	0.16		0.41																							
D	0.84	0.06	0.10		0.04	0.03	0.93																				
E				0.45		0.11	0.44																				
F				0.67	0.07		0.27																				
G				0.97	0.03	0		0.35					0.01	0.64													
I							0.63		0.29	0.71				0.37													
J								0.75		0.25																	
K								0.88	0.12		0.34	0.66															
L										0.90		0.10															
M										0.88	0.12																
N							0.44	0.06						0.50													
O							0.80	0.10					0.10												0.31	0.69	
P																							0.03	0.97			
Q														0.2										0.52	0.27		
R																		0.19			0.42			0.38			
S																	0.15				0.46			0.39			
T																					0.32	0.15					0.53
U																					0.32	0.15					0.53
V																			0.14	0.02		0.06					0.78
W																			0.31	0.03	0.42						0.24
X															0.59										0.41		
Y																		0.01	0.19	0.02	0.77	0.01					
Z														0.13												0.87	
AA																0.06								0.94			
AB																		0.02						0.98			

Bij het analyseren van de resultaten worden de eerste 30 minuten weggelaten, omdat het netwerk dan nog niet volledig is vol gestroomd met voertuigen (‘opwarmperiode’).

Bij elke kruising en invoeging is het microgedrag gekalibreerd om het voorsorteren en invoegen zo optimaal mogelijk te laten verlopen. De acties en parameterwaarden die hierbij zijn uitgevoerd, staan in bijlage 8.5.3. Na deze aanpassingen verloopt het invoegen en voorsorteren op alle kruisingen in het netwerk soepel. Stilstaande voertuigen komen zelden tot nooit meer voor.

C.3.1 Wat is er gemeten in de simulaties?

In het netwerk worden diverse indicatoren gelogd die gebruikt zullen worden om de hypothesen te beantwoorden. De volgende indicatoren zijn gelogd:

1. Gemiddeld aantal voertuigen dat een stopstreep passeert
2. Intensiteit [aantal voertuigen/uur];
3. Gemiddelde intensiteit van voertuigen per uur (data collection point +/- 200 meter voor en na een VRI.
4. Gemiddelde reistijd van het begin tot het eind van een route (zowel heen als terugweg op N201 en N205).
5. Gemiddelde reistijd over de kruising heen (ongeveer 200 meter voor en na een kruising. Zowel op de doorgaande weg N201 en N205 als op de kruisende richtingen van de N205).
6. Aantal voertuigen in een peloton ((C)ACC) dat dat door een groenfase heen gaat.
7. Voertuigverliesuren ten opzichte van het referentiescenario (aan de hand van reistijden over de routes en total network delay)
8. Gemiddelde peloton grootte voor (+/- 200 m) en na een VRI (alleen rond VRI 205191).
9. Time to collision aan de hand van trajectoriën nabij een kruising met afvallende strook. Hierbij is de time to collision gedefinieerd als de tijd tot er een botsing zou plaatsvinden als de snelheid gelijk zou blijven. Hieruit is het aantal momenten met een kritische time-to-collision afgeleid, waarbij de grenswaarde voor kritische time-to-collision 3 seconden is.

Een deel van de indicatoren wordt ook op basis van de praktijkdata berekend (voor zover mogelijk) als handmatig resultaat en ter validatie van de simulatie.

C.4 *iVRI's*

De kruisingen op de N205 zijn uitgerust met een iVRI (intelligente verkeersregelinstallatie). De regelingen zoals deze op straat zijn geïmplementeerd (in CCOL), zijn 1 op 1 overgenomen en gecompileerd voor de Vissim simulaties. Detectoren zijn overgenomen vanuit detailtekeningen van de kruisingen.

Voor het scenario met groenverlenging is deze functionaliteit toegevoegd aan de implementatie in CCOL voor alle kruisingen op de N205, door gebruik te maken van de 'tovergroen functionaliteit', als volgt: Een stroomopwaartse detector detecteert CACC-voertuigen (en geen andere typen voertuigen). Als er minstens 5 opeenvolgende CACC-voertuigen worden gedetecteerd, wordt de verlenging van de groenfase in gang gezet. De groenfase wordt vervolgens verlengd totdat de CACC voertuigen de stopstreep zijn gepasseerd of totdat de ingestelde maximumgroentijd is verstreken.
In de praktijktest (op de weg) is dit op vergelijkbare wijze getest, echter via directe communicatie tussen de CACC-voertuigen en de iVRI in plaats van met een detector. Deze functionaliteit is al aanwezig in de iVRI's op straat. Bij 'tovergroen' wordt de groenfase verlengd voor pelotons van trucks (in plaats van CACC-voertuigen). Dit kan worden aangepast voor andere typen voertuigen waarmee gecommuniceerd kan worden.



Figuur C.3 detail van kruising Vijfhuizerweg in Vissim

C.5 *Implementatie van de ACC en CACC controller*

De ACC en CACC-voertuigen in de simulaties worden aangestuurd door middel van een extern driver model in Vissim. Dit externe driver model overschrijft het normale gedrag van de voertuigen en wordt ingelezen uit een dll file, gecompileerd uit c++ code. De dll vraagt de posities, snelheden en acceleraties van de voertuigen op uit Vissim en berekent aan de hand van het control algoritme de acceleratie van het (C)ACC-voertuig. Deze acceleratie wordt terug gegeven aan Vissim.

Het algoritme voor het longitudinale volggedrag is gebaseerd op een control algoritme dat ontwikkeld is door TNO dat ook in de praktijktest voertuigen was geïmplementeerd. Zie ook Paragraaf D.3. Deze volgmodellen creëren een, voor de bestuurder, comfortabel en veilig acceleratie profiel. Echter, niet alle details uit de implementatie in de praktijktest voertuigen konden worden overgenomen in de simulaties, vanwege de te grote complexiteit voor een microsimulatiemodel. Het algoritme in de simulaties is gekalibreerd aan de hand van de meetdata uit de praktijktest, zoals toegelicht in de volgende bijlage, om zodoende het werkelijke control algoritme zo goed mogelijk te benaderen.

C.6 *Toevoegingen aan de ACC en CACC controller*

Om het control algoritme goed te laten functioneren in de simulaties, was het noodzakelijk om diverse gedragsregels toe te voegen die te maken hebben met het gebruik van het systeem bij interactie met andere voertuigen, zoals wanneer het systeem wordt uit- en weer aangezet, het rijstrookwisselgedrag en wanneer CACC-voertuigen in een peloton van CACC-voertuigen blijven rijden. Deze toevoegingen en aannames worden in deze paragraaf toegelicht.

Wat betreft de vorming van pelotons van CACC-voertuigen, geldt in de simulaties dat ACC- en CACC-voertuigen niet als pelotons vertrekken, maar onderweg pelotons vormen. Pelotons kunnen ook weer onderbroken worden, bijvoorbeeld door invoegingen van andere voertuigen of door inhalen bij verschillende wenssnelheden. Hierdoor rijden er pelotons van verschillende lengtes in de simulatie.
In de simulatie heeft elke bestuurder een wenssnelheid, welke hij zoveel mogelijk zal proberen te halen. Deze wenssnelheid wordt voor elke bestuurder getrokken uit een random verdeling rond de snelheidslimiet. Bij ACC en CACC moet er (zowel in de werkelijkheid als in de simulaties) een snelheid ingesteld worden, welke het voertuig zal proberen te rijden. In de simulaties is de aanname gedaan dat deze ingestelde snelheid gelijk is aan de wenssnelheid bij manueel rijden. Een gevolg hiervan is dat opeenvolgende voertuigen zelden precies dezelfde snelheid hebben ingesteld. Om te voorkomen dat bij een lagere snelheid van de voorligger een CACC-voertuig direct de intentie heeft om te gaan inhalen, is er een tolerantie ingesteld voor de snelheid van de voorligger ten opzichte van de eigen wenssnelheid van 5% onder de eigen wenssnelheid (zie ook punt 7 hieronder).

Het voorste voertuig van een peloton CACC-voertuigen kan de CACC controller niet gebruiken, omdat zijn voorligger geen CACC-voertuig is en er dus geen communicatie mogelijk is. Het voorste voertuig schakelt daarom automatisch over op ACC (indien hij binnen zijn detectierange een normaal voertuig als voorligger heeft) en op CC indien hij geen waarneembare voorligger heeft.

In het geval dat voor een specifiek voertuig ACC en CACC ontoereikend zijn, zullen de modellen die manueel gedrag simuleren de controle van een voertuig overnemen. De situaties waarin ACC en CACC ontoereikend zijn, zijn de volgende:

1. Acceleratie en deceleratie zonder voorligger (‘free flow’);
2. Acceleratie en deceleratie bij een verkeerslicht;
3. Kritische situaties waarin zeer hard remmen nodig is om een botsing te vermijden;
4. Rijstrookwisselgedrag
5. Strookwissel in klein hiaat;
6. Invoegingen;
7. Beslissen om niet in te halen maar in een platoon te blijven rijden.

Hieronder volgt een toelichting op deze situaties.

1. De (C)ACC controller werkt alleen indien er een voorligger is. Als een bestuurder zonder voorligger (in free-flow) wil accelereren, dan wordt dit gedaan volgens een snelheidsprofiel dat gecalibreerd is aan de hand van de data uit de praktijktest. Bij acceleratie vanuit stilstand is een kleine variatie toegevoegd in de parameters van de acceleratiecurve, om zodoende het verschil dat in de praktijk bestaat tussen verschillende implementaties van de (C)ACC in verschillende automerken/types te simuleren.
2. In de huidige ACC en CACC modellen is er geen interactie tussen voertuig en verkeerslicht beschreven. Om die reden is het aan de bestuurder om in te grijpen bij rood licht. In het model is verwerkt dat bij groen licht de bestuurder niet ingrijpt ((C)ACC blijft aan), en bij rood de bestuurder altijd ingrijpt, ongeacht het aantal voertuigen tussen de bestuurder en het

verkeerslicht. Bij geel zal de bestuurder inschatten of zijn voertuig met de huidige snelheid het verkeerslicht door kan d.m.v. een berekening met zijn huidige snelheid en de afstand tot de stopstreep, zo niet dan zal hij ingrijpen (remmen). Acceleratie van het eerste voertuig gebeurt na een reactietijd van 0.2 seconden volgens dezelfde acceleratiecurve als bij 1. De overige voertuigen volgen na een engine delay van 0.2 seconden door middel van het voertuig-volg algoritme van de (C)ACC controller.

3. Kritische situaties: Zowel ACC als CACC zijn niet in staat om in alle situaties op tijd tot stilstand te komen. Wanneer een kritische situatie voor komt zal de bestuurder moeten ingrijpen. Door altijd behalve de acceleratie van de (C)ACC ook te berekenen wat het acceleratiegedrag van een normale bestuurder zou zijn (het menselijk voertuig-volgmodel), kan bepaald worden of een kritische situatie optreedt. Wanneer het menselijk voertuig-volgmodel een kritische remactie zou willen uitvoeren, dan zal het manuele model de controle overnemen tot twee seconde na de remactie. Een kritische remactie is hierbij gedefinieerd als een deceleratie < -3 m/s^2. Om te voorkomen dat een bestuurder in het model snel achter elkaar de (C)ACC uit en weer aan zet, zal in het model een bestuurder het (C)ACC systeem pas weer na 3 seconden na een remactie aanzetten.
4. Het rijstrookwisselgedrag van een (C)ACC-voertuig is gelijk aan het rijstrookwisselgedrag van een manueel bestuurd voertuig. Dit betekent dat vanaf het begin van een rijstrookwisselactie het longitudinale gedrag van het (C)ACC-voertuig gelijk is aan een manueel bestuurt voertuig. Het voertuig zal manueel rijden totdat de volledige rijstrookwissel is voltooid en het voertuig weer evenwijdig staat met de rijrichting. Dan wordt direct de (C)ACC weer ingeschakeld (conform de situatie dat deze nog aan staat).
5. Strookwissel in klein hiaat: indien voor een ACC-voertuig een ander voertuig invoegt in een klein hiaat, zou dit leiden tot een sterke remactie van het ACC-voertuig. Bij een menselijke bestuurder en bij de CACC wordt er minder sterk geremd. De remactie van een ACC-voertuig is zo sterk dat dit zou leiden tot doorstromingsproblemen. In de praktijk zou een bestuurder zeer waarschijnlijk de ACC uit zetten. In de simulaties is er daarom gekozen om de ACC in deze situatie uit te schakelen totdat het voertuig een volgtijd van 1.9 seconde heeft bereikt. Deze waarde is bepaald door trial en error en observaties van de simulaties, zodanig dat de invoeging tot zo min mogelijk doorstromingsproblemen leidt.
6. Invoegingen; Als een ACC-voertuig zelf invoegt, gebeurt iets soortgelijks als bij punt 5. Om ook hier een te sterke remactie te voorkomen, wordt ook in deze situatie de ACC uitgeschakeld totdat een volgtijd van 1.9 seconde is bereikt.
7. Beslissen om niet in te halen maar in een peloton te blijven rijden: Een bestuurder van een normaal voertuig heeft de intentie om van strook te wisselen als zijn voorligger minder hard rijdt dan zijn eigen wenssnelheid. Een bestuurder van een (C)ACC-voertuig heeft er voordeel bij om ook bij een lagere snelheid dan zijn wenssnelheid achter zijn voorligger te blijven rijden omdat hij dan de CACC kan gebruiken. De tolerantie om achter een voertuig met lagere snelheid dan je wenssnelheid te blijven rijden is in de simulaties ingesteld op 5% van de eigen wenssnelheid. Dit is een expert aanname die niet met praktijkdata ondersteund kon worden.

C.7 *Aannames voor de opschaling*

Hieronder volgt een opsomming van de aannames die gedaan zijn bij het opschalen van de effecten:

1. De kruispunten van de gekozen hoge prioriteitswegen worden verondersteld representatief te zijn voor alle andere gesignaleerde kruispunten in de provincie met provinciale wegen.
2. De prestaties van kruispunten worden verondersteld afhankelijk te zijn van het verkeersvolume dat het nadert.
3. Het aantal rijstroken dat een kruispunt nadert wordt verondersteld representatief te zijn voor het verkeersvolume van de weg die dat kruispunt binnenkomt. Uit de literatuur blijkt dat het aantal rijstroken in elke richting een primair ontwerpcriterium is voor een kruispunt, en dit is direct afhankelijk van het verkeersvolume.
4. Er wordt geen rekening gehouden met het verkeersvolume dat naar verschillende richtingen is gesplitst. Alleen het totale aantal rijstroken van een naderende richting van een kruispunt wordt in aanmerking genomen.
5. Elke rijstrook van de zijwegen (niet-provinciale en niet-autowegen) wordt verondersteld 5% van het totale overige verkeersvolume op een kruispunt te bedragen. Deze aanname is het gevolg van het ontbreken van gegevens van deze kleinere wegen op kruispunten.
6. Het volume van wegen op kruispunten wordt met 2,5% verhoogd voor elke rijstrook van die weg op dat kruispunt. Dit is gedaan omdat het verkeersvolume uit de gegevens een gemiddelde is voor een bepaalde weg. Een weg passeert meerdere kruispunten, die sterk variëren in grootte, variërend van kruispunten met in totaal meer dan 15 naderende rijstroken tot kruispunten met in totaal 3 of 4 naderende rijstroken. Daarom wordt een correctiefactor ingevoerd om het volume op grote kruispunten te vergroten.
7. Het piekverkeersvolume per uur wordt verondersteld 15% van het totale verkeersvolume van de hele dag te bedragen. Dit is berekend op basis van de loggings van de VRI's die gebruikt zijn voor het simulatiemodel.
8. Het dalverkeersvolume per uur wordt verondersteld 10% van het totale verkeersvolume van de hele dag te bedragen. Dit wordt ook berekend op basis van de de loggings van de VRI's die gebruikt zijn voor het simulatiemodel.

Appendix D: Kalibratie met meetdata uit praktijktest

D.1 ***Inleiding***

D.1.1 Uitgangspunten

Voertuiggedrag in huidige situatie in het model zetten:
Om de effecten van een toepassing van ACC en CACC goed te bepalen is het van belang dat het huidige gedrag in het simulatiemodel zo goed mogelijk aansluit op de werkelijkheid. Meer specifiek betreft dit de rijgedragmodellen zoals de voertuig-volg en hiaat-acceptatie modellen. Het vereist expertise en ervaring om deze rijgedragmodellen aan te passen op basis van empirische data. Een deel van deze informatie komt uit het praktijkonderzoek. Echter, er zijn aanvullende aannames nodig voor situaties waarvoor geen of te weinig meetdata beschikbaar was uit de praktijktest.

Configuratie van algoritmes:
De empirische data uit de praktijktest worden gebruikt om de voertuigmodellen te kalibreren (zie dataverwerking als onderdeel van de uitvoering van het praktijkonderzoek). Dit zal ertoe leiden dat het gedrag van de (C)ACC-voertuigen in het model gaat lijken op het in de praktijk waargenomen gedrag van de praktijktestvoertuigen.

D.1.2 Doel

Het doel van een kalibratie is het zo efficiënt mogelijk instellen van modelparameters zodanig dat het gedrag van de voertuigen (CACC op de eerste plaats, maar reguliere voertuigen niet uitgesloten) lijkt op het gevonden gedrag uit de praktijktest en overeenkomstig eerdere bekende gedragingen van dergelijke voertuigen onder vergelijkbare omstandigheden.

D.2 ***Algemene aanpak***

D.2.1 Analyse van praktijktest-data

Voordat de data geanalyseerd is, wordt eerst een overzicht van beschikbare en valide metingen gemaakt, waaronder:

i) Welke scenario's*
ii) Welke variabelen**
iii) Betrouwbaarheid van de metingen

*Scenario's zijn beschreven in Paragraaf C.2.

**Variabelen zijn (in volgorde van belang):
Waarneembaar (en eventueel instelbaar) in model:

- Space headway (netto) h
- Speed v
- Acceleration a
- Communication delay φ
- Engine physics τ
- Standstill distance r

Waarneembaar (geen model variabelen/parameters):

- Time headway (volgtijd);
- Lateral distance to object (laterale afstand tot object);
- Lateral distance to lane marking (laterale afstand tot strookmarkering);
- Distance to next traffic signal (afstand tot het volgende verkeerslicht);
- Distance to leading vehicle in platoon (afstand tot voorste voertuig van het peloton);
- Platoon position (positie in het peloton).

Vervolgens worden verdelingen opgesteld van de belangrijkste variabelen. Deze kunnen, naar gelang van relevantie, zijn:

i) Variabelen per scenario en per voertuiglocatie;
ii) Variabelen over scenario's;
iii) Variabelen over voertuiglocatie in een platoon;
iv) Variabelen over gebeurtenis (bijv. optrekken, versnellen, e.d.).

D.2.2 Pre-kalibratie: situatie analyseren van het model

Voordat het kalibratieproces echt begint, is het nodig om eerst een analyse uit te voeren van de (C)ACC gedragingen in het simulatiemodel met gebruik van de uitgangsinstellingen van de controllers. Dit geeft een referentie waaraan de volgende kalibratie-iteraties getoetst kunnen worden op verbetering ten opzichte van de praktijktest data. Deze toetsing vind plaats door vergelijkbare verdelingen op te stellen als die uit de praktijktest data.

D.2.3 Theoretische kalibratie

De kalibratie van de controller beslaat het stapsgewijs aanpassen van de controller parameters en model variabelen zodanig dat het gedrag van de voertuigen gaat lijken op het gedrag dat gevonden is tijdens de praktijktest. Dit wordt vooral gedaan op basis van:

i) Vergelijking met de verdelingen uit de praktijktest data;
ii) Kennis van het CACC algoritme;
iii) Rekening houden met de beperkingen van de gebruikte simulatieomgeving en modellen.

D.2.4 Model kalibratie en validatie

Na herhaaldelijke modelruns uitgevoerd te hebben, waarbij de controller parameters en modelvariabelen steeds stuk voor stuk worden ingesteld, wordt een set instellingen verkregen die geldt als het gekalibreerde model. Het model wordt vervolgens getoetst op het grote netwerk, kijkend naar de gekozen indicatoren. Als de verkregen uitkomsten van deze tests reëel zijn in vergelijking met de praktijktest en met de verwachtingen gebaseerd op expert judgement, dan kan het model gevalideerd worden en ingezet worden voor de studie. Als verdere aanpassingen nodig zijn, dan volgt een nieuwe kalibratie iteratie totdat de voertuigen in het model zich gedragen zoals verwacht wordt.

D.3 ***CACC model***

D.3.1 Theoretische beschrijving

De basis van de controllers in het model is gelijk aan de basis van de controllers die ook in de praktijk zijn ingezet in de praktijktest. Deze controllers zijn vertaald naar de modelomgeving en zo ingesteld dat de voertuigen met ACC en CACC in het model zich op vergelijkbare wijze gedragen als in de praktijktest.

De CACC controller in de simulatie heeft alleen het volggedrag in situaties zonder crashgevaar overgenomen uit het CACC ontwerp van Ploeg et al (2011).
De kern van de controller maakt gebruik van de volgende vergelijkingen:

$$\begin{pmatrix} \dot{d}_i(t) \\ \dot{v}_i(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{i-1}(t) - v_i(t) \\ -\frac{1}{\tau} v_i(t) + \frac{1}{\tau}\mu_i(t-\phi) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{e}_{1,i} \\ \dot{e}_{2,i} \\ \dot{u}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k_p}{\tau} & -\frac{1+k_d}{\tau} & 0 \\ \frac{k_p}{h} & \frac{k_d}{h} & -\frac{1}{h} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_{1,i} \\ e_{2,i} \\ u_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1-k_{ff}}{\tau} \\ \frac{k_{ff}}{h} \end{pmatrix} \mu_{i-1}$$

Hierin is *d* de afstand tot de voorligger, *v* de snelheid, *u* de wenssnelheid en e_1 en e_2 de fout in respectievelijk de plaats en de snelheid. De overige variabelen worden hieronder toegelicht:

De controller heeft als **input parameters**:

1. communicatie vertraging ϕ is 0,1 sec (onmogelijk te veranderen, gelijk aan de grootte van de simulatietijdsstap)
2. gewenste volgtijd h

Verder bevat de controller de volgende variabelen die voor **kalibratie** gebruikt kunnen worden:

3. gain voor spacing error K_p,
4. gain voor velocity error K_d,
5. gain voor desired velocity K_{ff},
6. engine delay τ.

De ‘gain’ waarden betreffen gevoeligheidsparameters die iets zeggen over de mate waarin de controller reageert op de betreffende grootheden: volgafstand, snelheid en gewenste snelheid van een voertuig. Voor meer informatie over de controller, wordt verwezen naar de paper van Ploeg et al (2011).

De uitgangswaarden van de parameters zijn:

τ	Engine delay	0,5	s^{-1}
h	Time gap	0,3	s
k_p	gain	0,5	[-]
k_d	gain	0	[-]

k_{ff}	gain	1	[-]
r_i	Standstill distance	2,5	m

D.3.2 Verschil ACC en CACC

Een ACC-voertuig heeft geen communicatie met zijn voorligger en beschikt daarom over minder (nauwkeurige) informatie betreffende de snelheid, headway en wenssnelheid van zijn voorligger. Dit is als volgt geïmplementeerd: de informatie over zijn voorligger wordt opgehaald met een vertraging van enkele tijdsstappen. Er wordt dus informatie uit het verleden gebruikt in het algoritme. Deze informatie is in het model opgeslagen in een kleine database voor elk voertuig. De vertragingstijd is een kalibratieparameter ('ACC time delay hw' en 'ACC time delay lead veh velocity' in Tabel D.1 in Paragraaf D.6).
Daarnaast geldt dat er geen informatie beschikbaar is over de wenssnelheid van de voorligger. In het geval van CACC wordt deze in de praktijk afgeleid uit de positie van het gaspedaal. In het model voor ACC wordt de parameter k_{ff} gelijk gesteld aan 0.

D.4 ***CACC kalibratieproces***

D.4.1 Maatgevende variabelen

Uit de praktijktest data waren verschillende gegevens beschikbaar. De belangrijkste variabelen waren:

- Snelheid
- Stuurhoek
- Stuurkoppel
- Rempedaal/remlicht
- Wheelspeeds
- Gaspedaal
- Gevraagd vermogen.
- Ax/Ay
- ACC on/off
- ACC Distance(time)
- ACC speed
- LKA On/off
- Stuur los/vast
- LDW warning
- Collision warning
- CC on/off
- ACC speed
- iVRI's, inclusief hoe we die qua timestamp kunnen koppelen
- Info van de omgeving (Mobileye)

Dit geeft veel mogelijkheden om de controller en model in te regelen. Echter, in het kader van efficiëntie en omdat modellen altijd inherente afwijkingen vertonen ten opzichte van de werkelijkheid, dient er met prioriteit gekalibreerd te worden. Daarom zijn de volgende variabelen/parameters geselecteerd als maatgevend uit de data:

- Space headway (netto) h
- Speed v

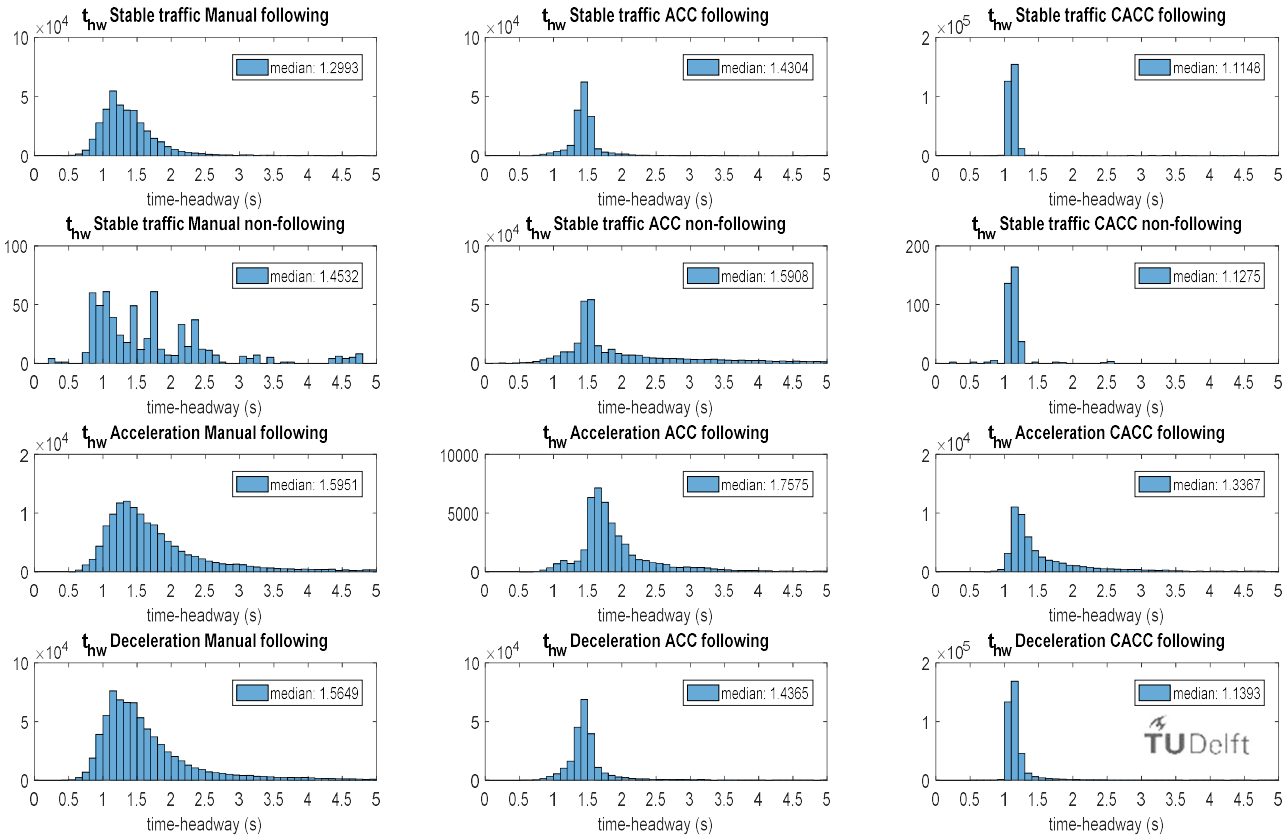
- Acceleration a
- Communication delay φ
- Behaviour at traffic signals
- Standstill distance ri

Overige parameters en variabelen zijn ingezet, wanneer bleek dat daar behoefde aan was in het kader van het kalibratieproces.

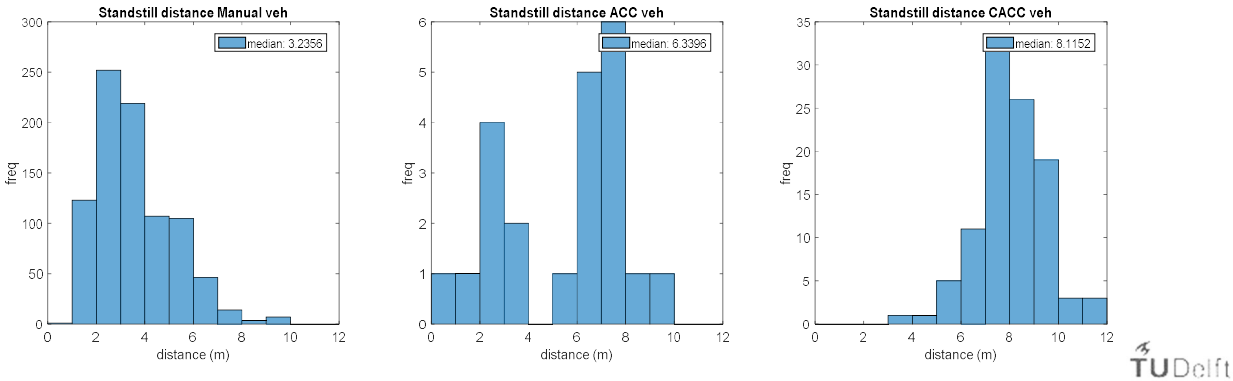
D.5 *Data uit de praktijktest*

Hieronder worden enkele van de belangrijkste overzichten weergeven die uit de praktijktest data zijn afgeleid. Uiteraard zijn er nog meer gegevens gehaald uit de aanwezige data, maar dat leent zich niet om hier weer te geven in dit overzicht in verband met de leesbaarheid.

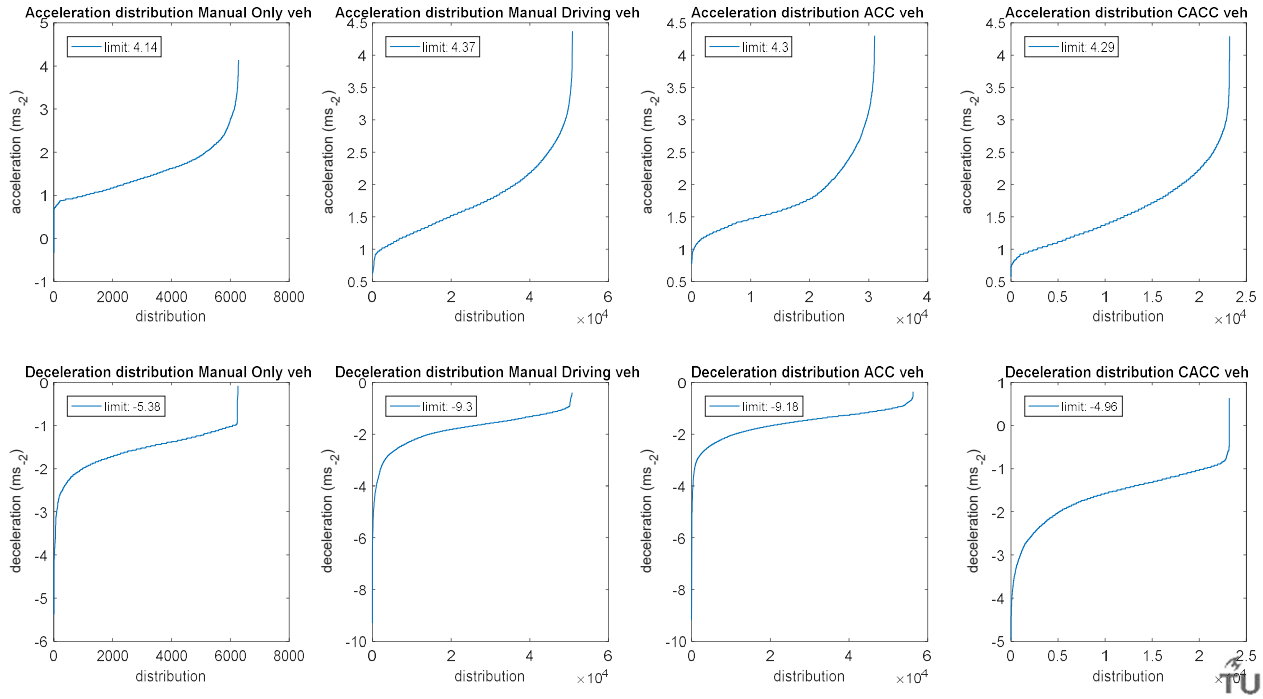
In de volgende figuren staan weergegeven: de volgtijden in verschillende soorten verkeer (Figuur D.1), stopafstanden van de voertuigen (Figuur D.2) en cumulatieve verdelingen van de versnellingen en vertragingen (Figuur D.3).



Figuur D.1 volgtijden in de verschillende soorten verkeer (stabiele verkeersstromen, remmend, versnellend) en voor voertuigen in normale rijmodus, ACC-, en CACC-modus

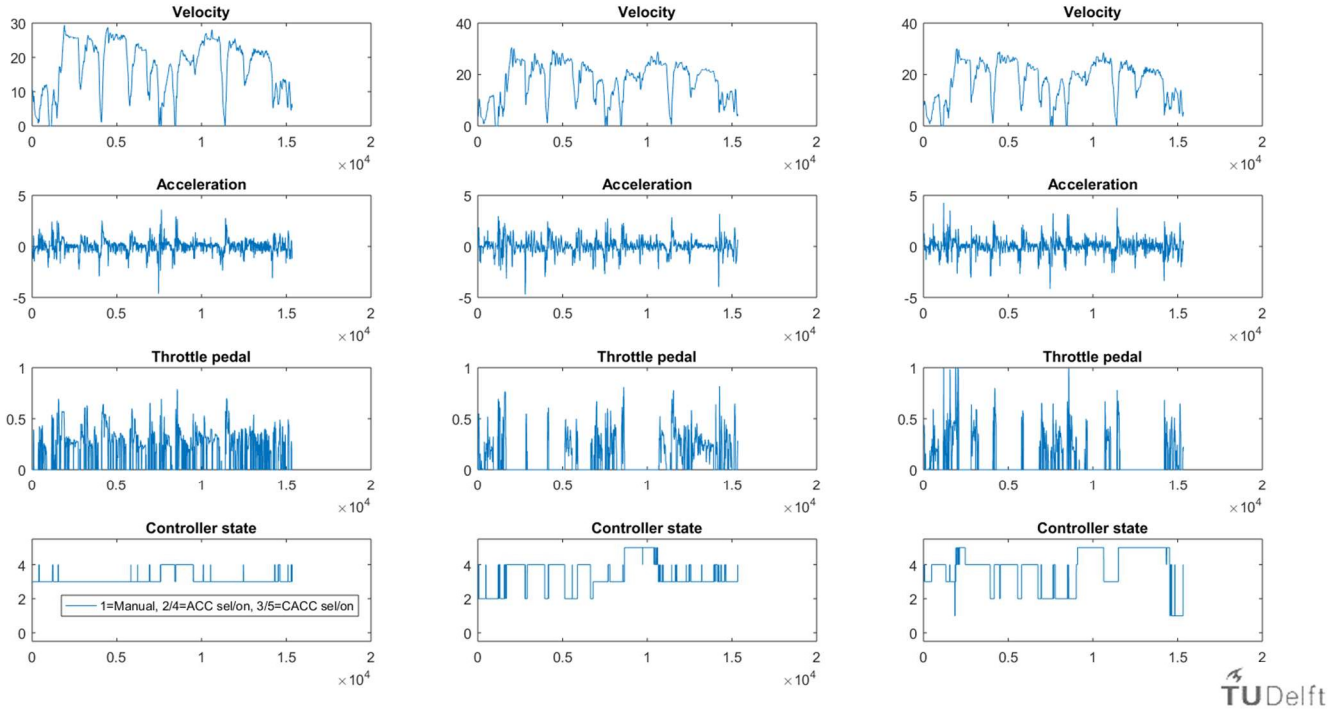


Figuur D.2 Stopafstanden van de voertuigen in normale modus, ACC- en CACC-modus



Figuur D.3 Cumulatieve verdelingen van de versnellingen en vertragingen voor dezelfde soorten verkeer (stabiele verkeersstomen, remmend, versnellend) en voorvoertuigen in normale rijmodus, ACC-, en CACC-modus

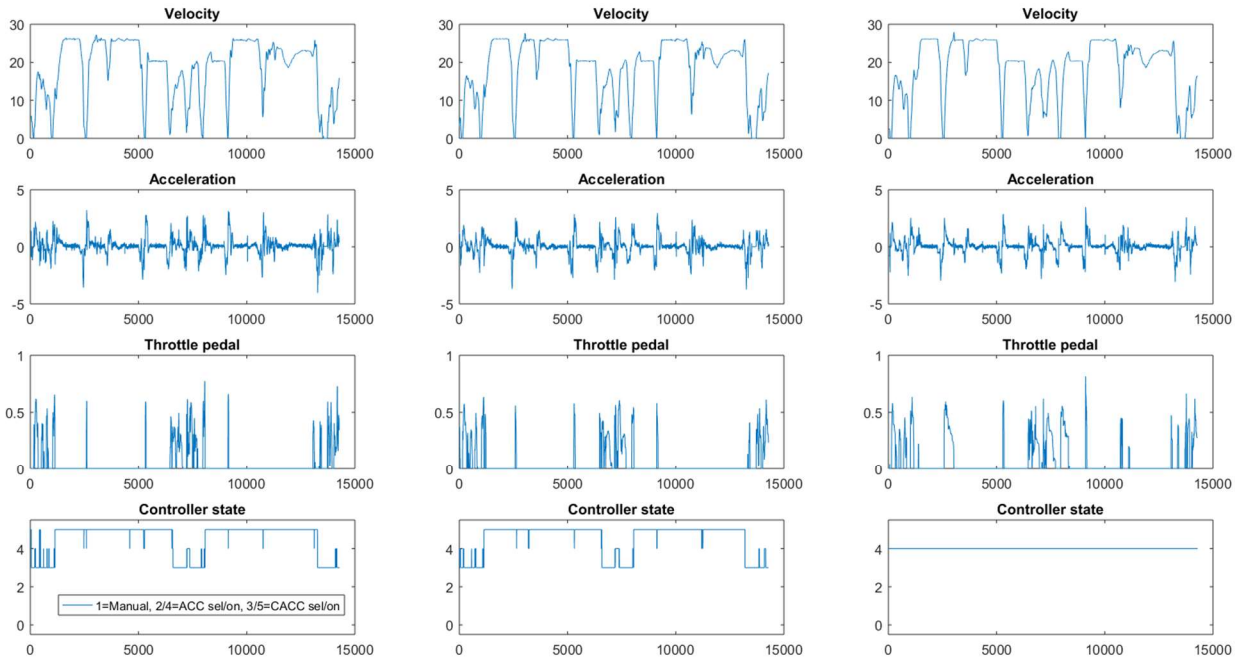
Daarnaast zijn inzichten verkregen uit analyse van enkele afzonderlijke praktijktest-runs. Hieronder wordt een tweetal voorbeelden gegeven, waarin de snelheid, versnelling, gaspedaaltoestand en controller status worden weergegeven. De eerste is voor een CACC-run (Figuur D.4). De tweede betreft een run met CACC-platooning (Figuur D.5).



Figuur D.4: Snelheid, versnelling, gaspedaaltoestand en controller status voor een CACC run

D.6 *CACC kalibratie en instellingen*

Na het kalibratieproces doorlopen te hebben, zijn waarden verkregen voor de controllers en het model die gebruikt zijn als gekalibreerde settings voor de simulatie. Deze waarden staan weergegeven in Tabel D.1.



Figuur D.5 Snelheid, versnelling, gaspedaaltoestand en controller status voor een run met CACC platooning

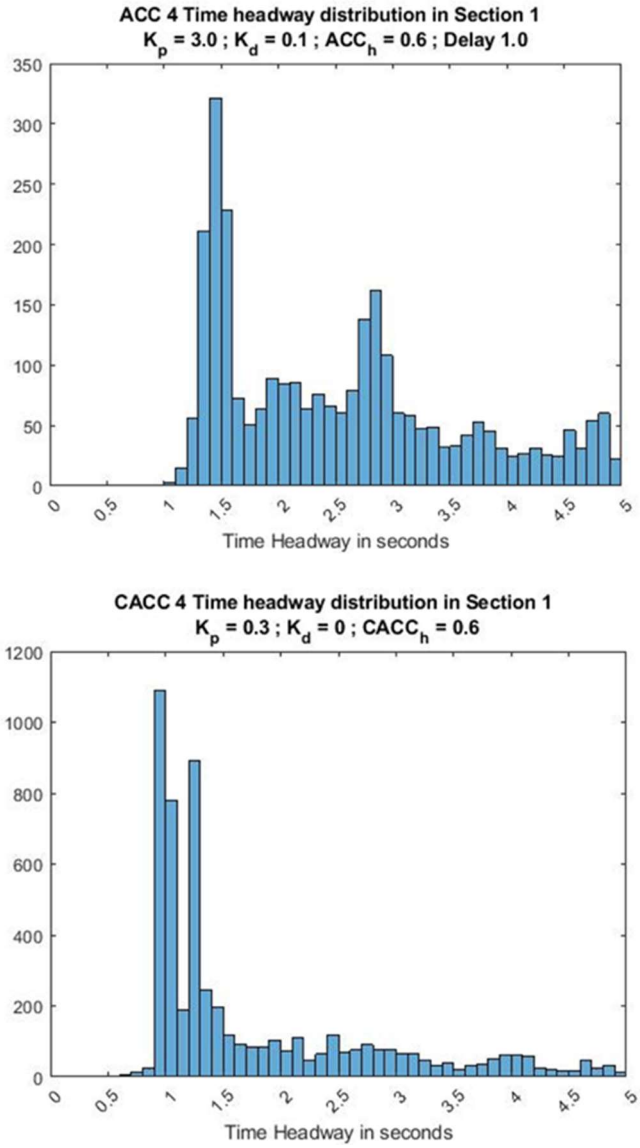
Tabel D.1 gekalibreerde settings van het CACC algoritme

Parameter/variable	Default (model)	**Calibrated settings:**
Confirmed from data:		
- Max accel CC	1.5	1.9
- ACC_h	0.6	0.6
- ACC_range	150	200
- CACC tau	0.5	0.5
- CACC_h	0.6	0.6
Calibrated from data (i.e. adjusted to change vehicle behaviour according to praktijktest data):		
- ACC time delay hw		1.0 s
- ACC time delay lead veh velocity		1.0 s
- ACC k_p	2	2.0
- ACC k_d	0.1	0.1
- ACC r_i	2.5	7
- CACC k_p	0.5	0.3
- CACC k_d	0	0.0
- CACC r_i	2.5	7
Checked with vehicle settings :		
- CACC upper speed factor	1	1
- CACC lower speed factor	0.9	0.9
- CACC_k_ff -> 1	1.0	1.0

- CACC range		150

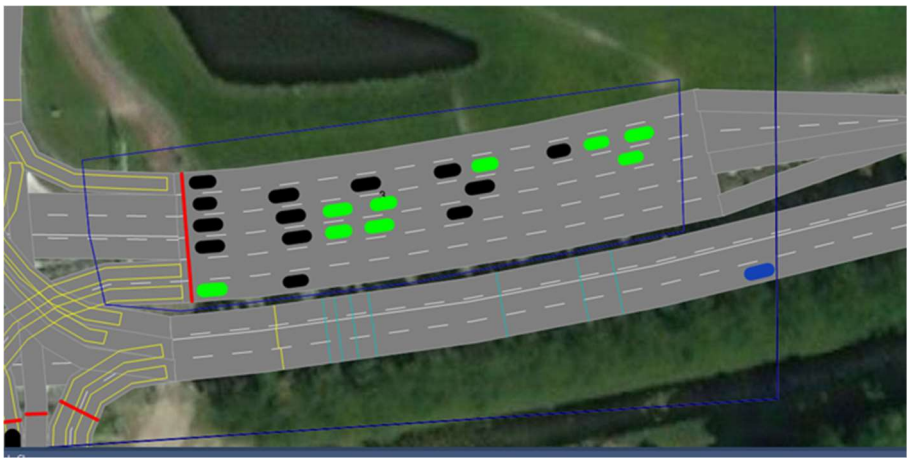
Alle overige parameters/variabelen hebben de default instellingen gekregen of zijn verder aangepast tijdens de kalibratie van het basismodel voor gewone voertuigen.

Deze instellingen hebben geleid tot de volgende verdelingen die vergeleken zijn met de uitkomsten van de praktijktest-data voor wat betreft de ACC-modus en CACC-modus op een recht stuk weg:



Figuur D.6 Volgtijd in seconden voor ACC (boven) en CACC (onder).

Verder hebben we gecheckt dat de stopafstanden goed gehanteerd worden door het model, zoals te zien in Figuur D.7. De zwarte CACC-voertuigen hebben een duidelijk grotere stopafstand dan de manuele voertuigen, hetgeen ook gemeten is in de praktijktest.



Figuur D.7 Stilstaand verkeer met zichtbare stopafstanden voor een verkeerslicht. Zwarte voertuigen zijn CACC-voertuigen, groene voertuigen zijn manuele voertuigen.

D.6.1 CACC controller validatie

De settings zijn doorgevoerd in het gekalibreerde simulatienetwerk en gecontroleerd op juist gedrag. De voertuigen met gekalibreerde settings lieten een correct gedrag zien, ook in het complete netwerk.
Echter, wel werd bij visuele controle duidelijk dat interacties met de rest van het verkeer kunnen leidden tot ongewenste situaties, zoals sterke remacties bij het invoegen vlak voor een (C)ACC-voertuig. Aanpassingen die hiervoor gedaan zijn, zijn toegelicht in Paragraaf C.6.

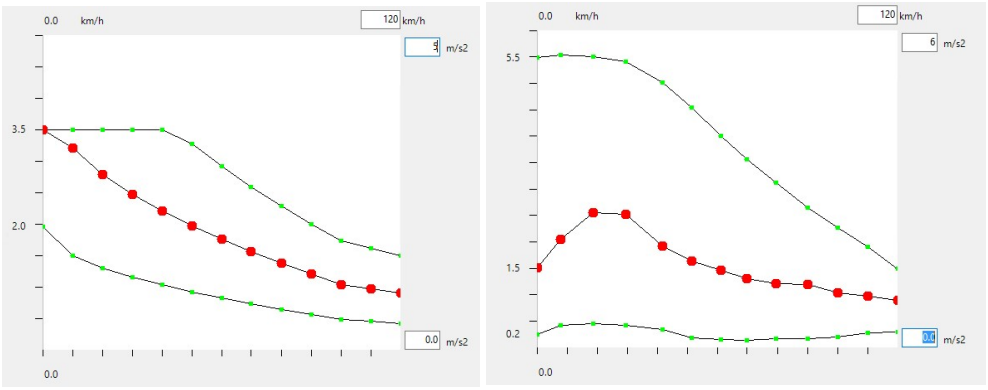
D.7 ***Kalibratie referentiegedrag in Vissim***

Het gedrag van de manuele voertuigen in Vissim is eveneens gecalibreerd aan de hand van de metingen uit de praktijktest, aangevuld met visuele observaties van het rijgedrag in de simulaties.

De belangrijkste issues die gevonden zijn bij de simulatie van manuele voertuigen in Vissim, zijn:
1. Een onrealistisch acceleratieprofiel;
2. Te korte volgtijd tot de voorligger;
3. Invoegproblemen;
4. Het ontbreken van ‘engine delay’.

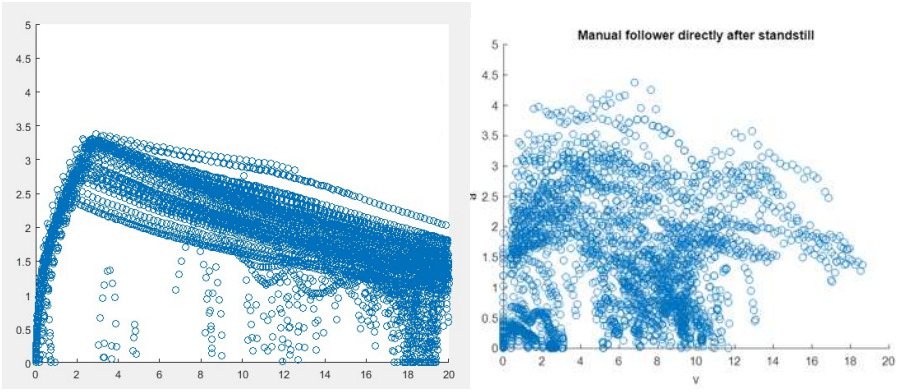
D.7.1 Verbeteren van het acceleratieprofiel

In VISSIM wordt het acceleratieprofiel vanuit stilstand gedefinieerd door een acceleratiecurve bestaand uit een gewenste, minimale en maximale curve, zoals in Figuur D.8, en drie parameters van het Wiedemann model (Wiedemann 99 CC7, CC8 and CC9).



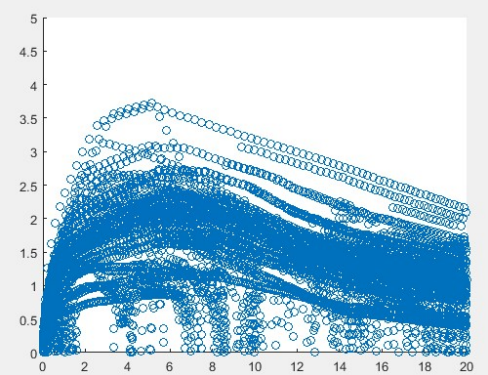
Figuur D.8 gewenste acceleratiecurve volgens de default instelling in Vissim (links) en de gekalibreerde curve (rechts)

De default instellingen resulteren in een snelheids-acceleratie plot zoals in Figuur D.9 (links), terwijl de metingen iets heel anders laten zien (Figuur D.9 rechts). Het Vissim model heeft veel minder spreiding dan de metingen.



Figuur D.9 acceleratie-snelheidsplot bij acceleratie vanuit stilstand, figuur links: default instelling in Vissim, figuur rechts: gemeten in de praktijktest

Door de Wiedemann parameters en het acceleratieprofiel aan te passen, is een beeld verkregen dat meer lijkt op de metingen. De volgende parameters zijn gekozen: CC7 = 1.00, CC8 = 4.5, CC9 = 1.5 (Wiedemann 99). Het acceleratieprofiel is aangepast zoals in Figuur D.9 (rechts). De gekalibreerde instellingen laten meer variatie zien in het acceleratie-snelheidsplot, zoals te zien in Figuur D.10:



Figuur D.10 acceleratie-snelheidsplot van Vissim behorende bij de aangepaste instellingen

D.7.2 Volgtijd

De volgtijd van manuele bestuurders zoals gemeten in de praktijktest ligt rond de 1.2 seconden (zie Figuur D.1). De default instellingen van Vissim leiden tot een te korte volgtijd. In Vissim is geen parameter waarmee je de exacte volgtijd kunt instellen. Er zijn wel een aantal parameters die de volgtijd beïnvloeden. Door diverse instellingen uit te proberen is gevonden dat de waarde uit de praktijktest benaderd kon worden door de parameter CC1 in te stellen op 0.9.

D.7.3 Invoegen en voorsorteren

Om het invoegen en voorsorteren van de manuele voertuigen soepel te laten verlopen, zijn de volgende acties zijn uitgevoerd:

- Routes tot over de kruising laten doorlopen: In Vissim kun je de routering modelleren d.m.v. routes bij elke kruising (of beslissingspunt voor meerdere route alternatieven) in het netwerk. Het is belangrijk dat deze route aan beide kanten van de kruising lang genoeg doorloopt, zodat voertuigen lang genoeg de tijd hebben om zo nodig van strook te wisselen. Als deze route te kort is, doen ze dit allemaal op hetzelfde punt, wat kan leiden tot stilstand en opstoppingen.
- Lange afstand om vooruit te kijken vanuit de connectoren. In Vissim is aan iedere connector een stroomopwaartse afstand gekoppeld vanaf welke afstand bestuurders weten dat ze over deze connector moeten als deze op hun route ligt. Deze afstand moet langer zijn dan de lengte van de stroomopwaartse link om stilstanden en opstoppingen te voorkomen.
- Aangepast gedrag op de links direct stroomopwaarts van een kruising:
  - Coöperatief invoeggedrag aangezet. Dit is een optie in Vissim om voertuigen meer rekening met elkaar te laten houden bij het invoegen. Voertuigen op de strook waarnaar ingevoegd wordt, schuiven indien mogelijk ook een strook op. Ook zijn de parameters van het coöperatief invoegen aangepast (maximum speed difference: 80 km/h in plaats van 3 km/h, maximum collision time: 3 seconden in plaats van 10 seconden).
  - Gap acceptance (‘safety reduction factor’) kleiner (waarde: 0.2 in plaats van de default waarde van 0.6): de safety reduction factor zorgt ervoor dat kleinere gaps geaccepteerd worden bij het invoegen, zodat er minder stilstanden voorkomen doordat het niet mogelijk was om op tijd in te voegen.

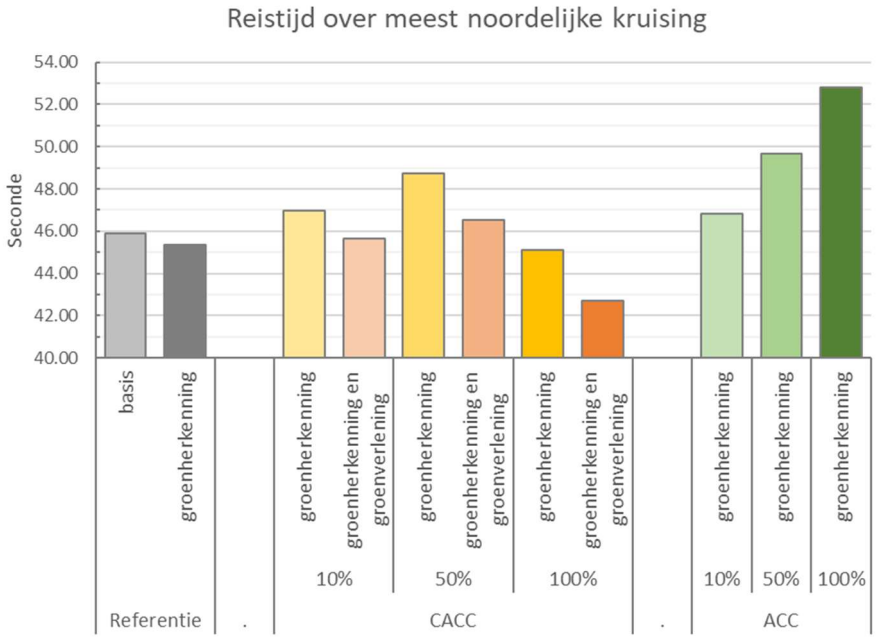
D.7.4 Het ontbreken van 'engine delay'.

Voertuigen in Vissim reageren direct indien er geremd of geaccelereerd moet worden. Er is dus geen 'engine delay', terwijl dat er bij de CACC en met name de ACC wel is (zowel in de simulaties als in de praktijk). Er is ook geen instelling in Vissim waarmee dit nagebootst kan worden. Het gedrag van de manuele voertuigen in Vissim is daardoor iets te efficiënt en niet geheel realistisch.

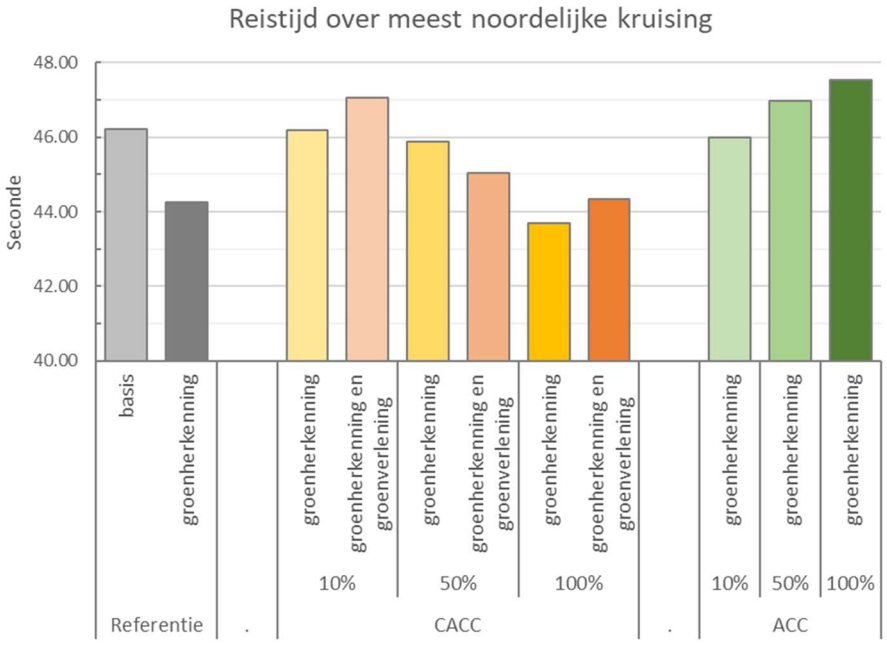
Appendix E: Additionele figuren bij resultaten

E.1 ***Reistijden***

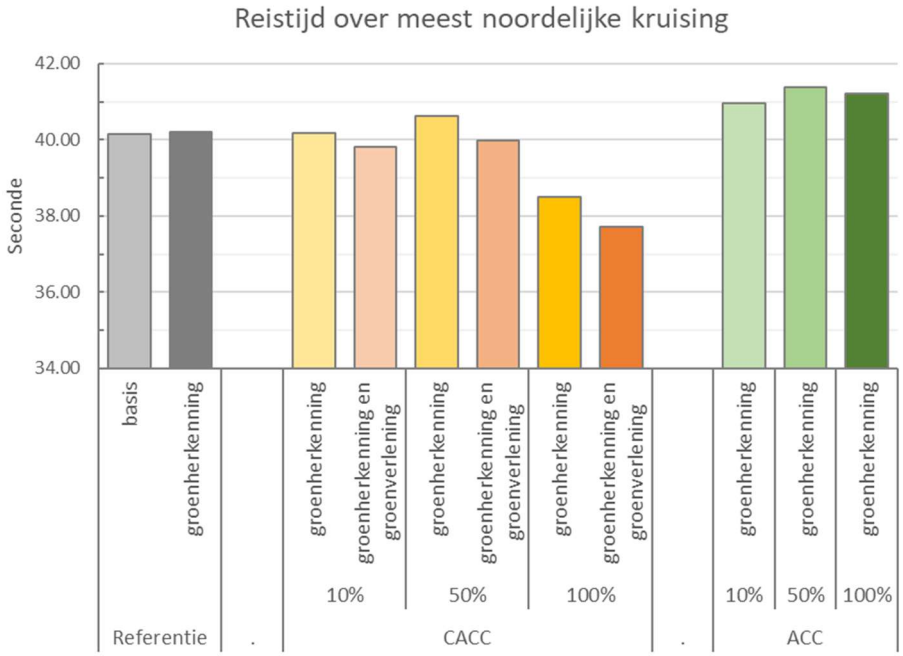
E.1.1 Additionele figuren reistijden kruising Drie Merenweg met Schipholweg.



Figuur E.1 reistijd over meest noordelijke kruising (kruising Drie Merenweg met Schipholweg) in de doorgaande rijrichting van **noord naar zuid** bij **hoge verkeersdrukte**



Figuur E.2 reistijd over meest noordelijke kruising (kruising Drie Merenweg met Schipholweg) in de doorgaande rijrichting van **zuid naar noord** bij **lage verkeersdrukte**



Figuur E.3 reistijd over meest noordelijke kruising (kruising Drie Merenweg met Schipholweg) in de doorgaande rijrichting van **noord naar zuid** bij **lage verkeersdrukte**

E.1.2 Tabellen reistijden

De procentuele verandering in de gemiddelde reistijd ten opzichte van de referentie voor alle scenario's en alle kruisingen is weergegeven in Tabel E.1 - Tabel E.3. In de richting noord-zuid bij druk verkeer en 100% CACC met groenverlenging geldt een

verbetering van 3% van de reistijd over alle kruisingen samen. In de richting zuid-noord is de gemiddelde reistijdverbetering in druk verkeer over alle kruisingen 19%, en bij de noordelijkste kruising zelfs 39%.

Tabel E.1 procentuele verandering ten opzichte van het referentiescenario richting noord-zuid bij druk verkeer

Kruising/traject	136	167	191	229	250	alle kruisingen	hele traject
CACC 10 %	2%	1%	0%	1%	0%	1%	3%
CACC 10 % met groenverlenging	-1%	-1%	0%	2%	0%	0%	1%
CACC 50 %	6%	4%	2%	5%	2%	4%	19%
CACC 50 % met groenverlenging	1%	-2%	0%	10%	3%	2%	16%
CACC 100 %	-2%	-2%	3%	3%	-2%	0%	15%
CACC 100 % met groenverlenging	-7%	-7%	1%	4%	-5%	-3%	8%
ACC 10 %	2%	0%	0%	2%	-1%	1%	3%
ACC 50 %	8%	8%	1%	36%	9%	12%	66%
ACC 100 %	15%	13%	4%	88%	9%	25%	144%

In Tabel E.2 en Tabel E.3 zijn de resultaten gegeven voor rustig verkeer.

Tabel E.2 procentuele verandering ten opzichte van het referentiescenario richting noord-zuid bij rustig verkeer

	136	167	191	229	250	alle kruisingen	hele traject
CACC 10 procent	0%	1%	1%	-3%	3%	0%	6%
CACC met groenverlenging 10 procent	-1%	3%	1%	-3%	3%	0%	4%
CACC 50 procent	1%	1%	2%	-3%	2%	1%	6%
CACC met groenverlenging 50 procent	0%	-2%	0%	-3%	1%	-1%	4%
CACC 100 procent	-4%	-1%	2%	-5%	2%	-2%	4%
CACC met groenverlenging 100 procent	-6%	-5%	2%	-5%	0%	-3%	5%
ACC 10 procent	2%	1%	1%	-3%	2%	1%	6%
ACC 50 procent	3%	1%	1%	-3%	2%	1%	8%
ACC 100 procent	3%	2%	1%	-4%	3%	1%	6%

Tabel E.3 procentuele verandering ten opzichte van het referentiescenario richting Zuid-Noord bij rustig verkeer

	136	167	191	229	250	alle kruisingen	hele traject

CACC 10 procent	0%	3%	-1%	0%	-4%	-2%	0%
CACC met groenverlenging 10 procent	2%	4%	-1%	1%	-3%	-2%	-3%
CACC 50 procent	-1%	2%	-1%	1%	-6%	-2%	-1%
CACC met groenverlenging 50 procent	-3%	1%	-2%	-1%	-5%	-2%	-1%
CACC 100 procent	-5%	-1%	-3%	-2%	-12%	-8%	-2%
CACC met groenverlenging 100 procent	-4%	-4%	-4%	-4%	-10%	-1%	-3%
ACC 10 procent	0%	2%	-1%	0%	-4%	-4%	2%
ACC 50 procent	2%	3%	-1%	1%	-5%	-4%	0%
ACC 100 procent	3%	2%	-1%	-1%	-8%	-3%	-2%

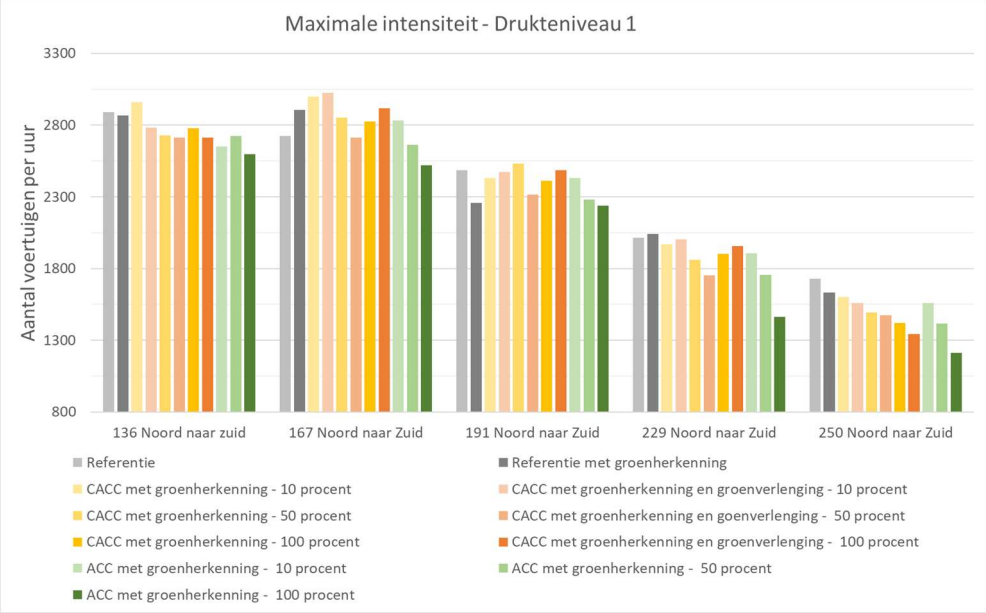
E.1.3 Tabellen reistijdveranderingen op kruisende richtingen.

Tabel E.4 procentuele verandering van de reistijd ten opzichte van het referentiescenario voor de kruisende richtingen (gezamenlijk west-oost, oost-west) bij druk verkeer

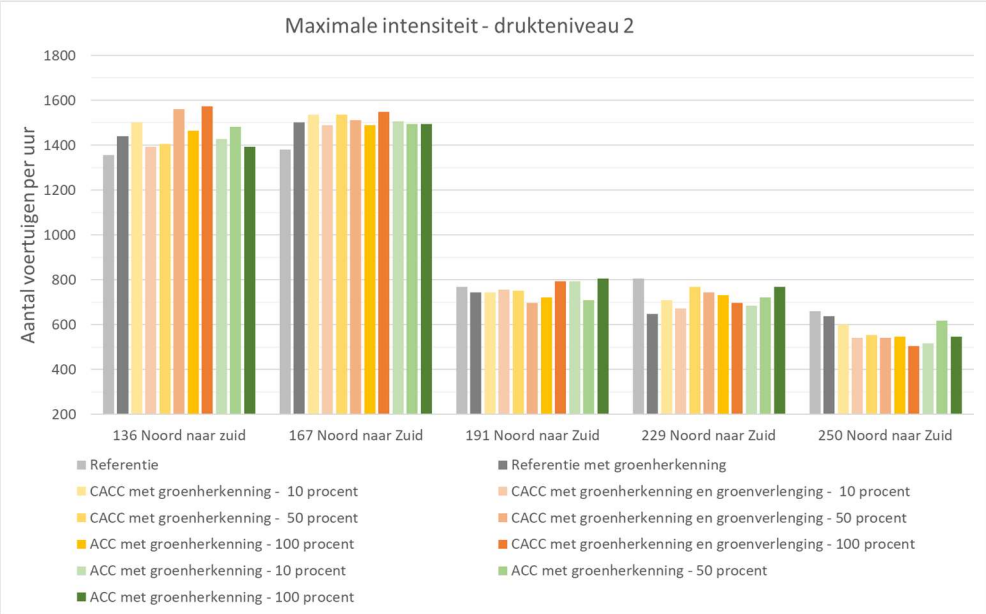
	kruisend	doorgaand
CACC 10 %	5%	2%
CACC 10 % met groenverlenging	12%	-1%
CACC 50 %	10%	7%
CACC 50 % met groenverlenging	19%	3%
CACC 100 %	0%	-5%
CACC 100 % met groenverlenging	20%	-11%
ACC 10 %	8%	2%
ACC 50 %	29%	27%
ACC 100 %	35%	40%

E.2 ***Intensiteiten***

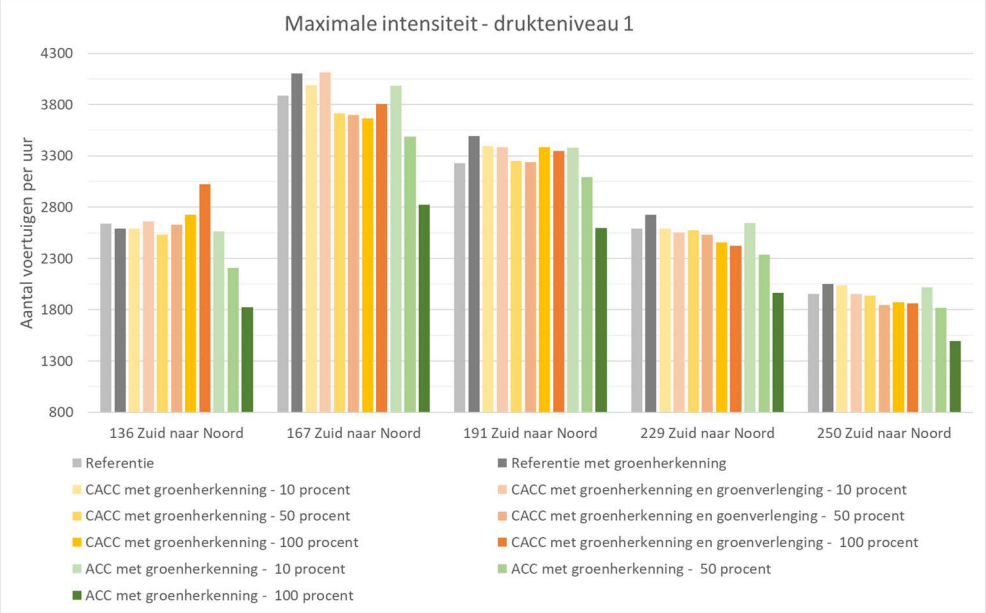
Intensiteiten worden aangegeven per rijbaan. Wanneer een rijbaan meerdere rijstroken heeft, zal ook de intensiteit op deze baan hoger liggen. In dit onderdeel laten we in additionele figuren zien wat het effect van verschillende ACC en CACC scenario's is op de maximale intensiteit (voertuigen per uur) op een rijbaan tijdens de simulatie.



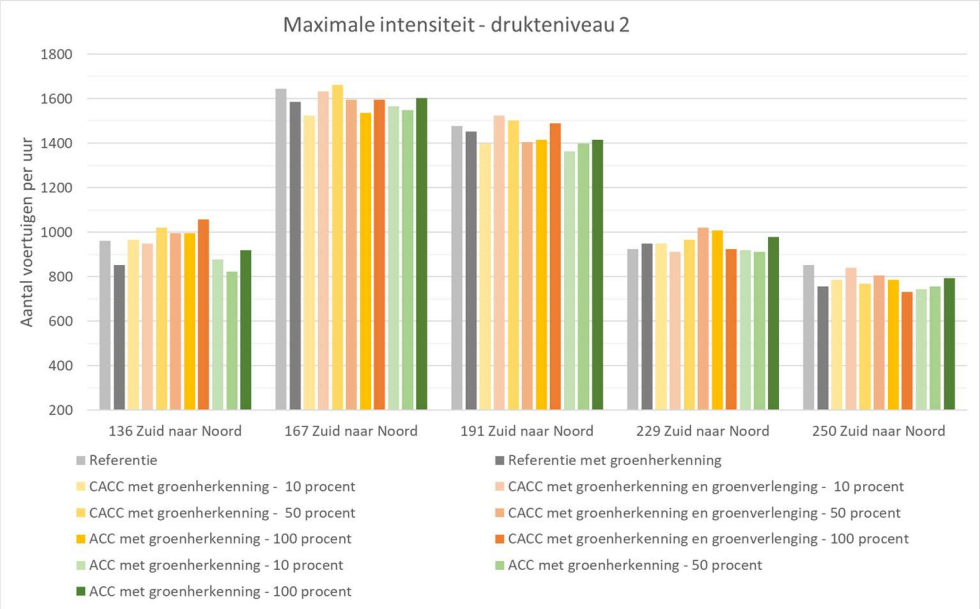
Figuur E.4 maximale intensiteit (aantal passages per uur) bij hoge drukte van noord naar zuid



Figuur E.5 maximale intensiteit (aantal passages per uur) bij lage drukte van noord naar zuid



Figuur E.6 maximale intensiteit (aantal passages per uur) bij hoge drukte van zuid naar noord

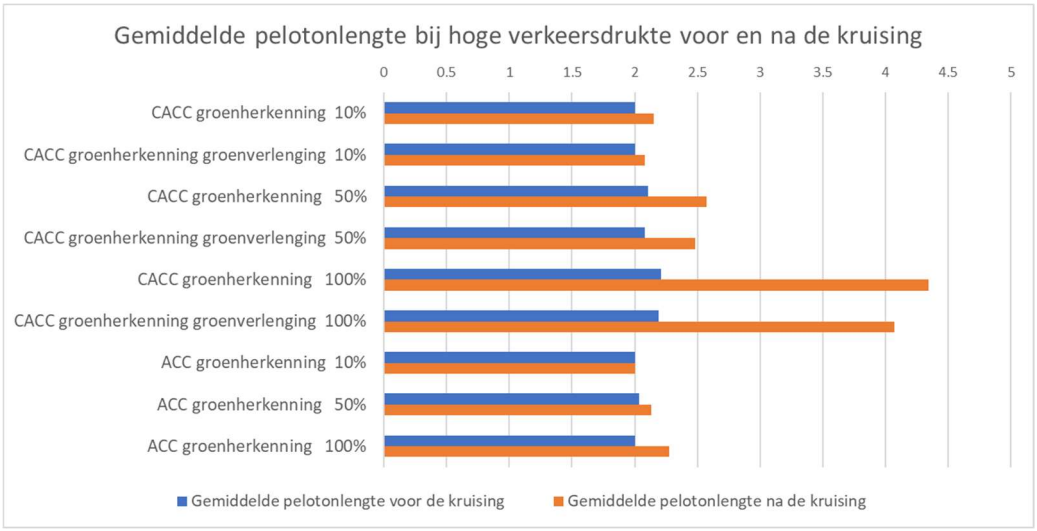


Figuur E.7 maximale intensiteit (aantal passages per uur) bij lage drukte van zuid naar noord

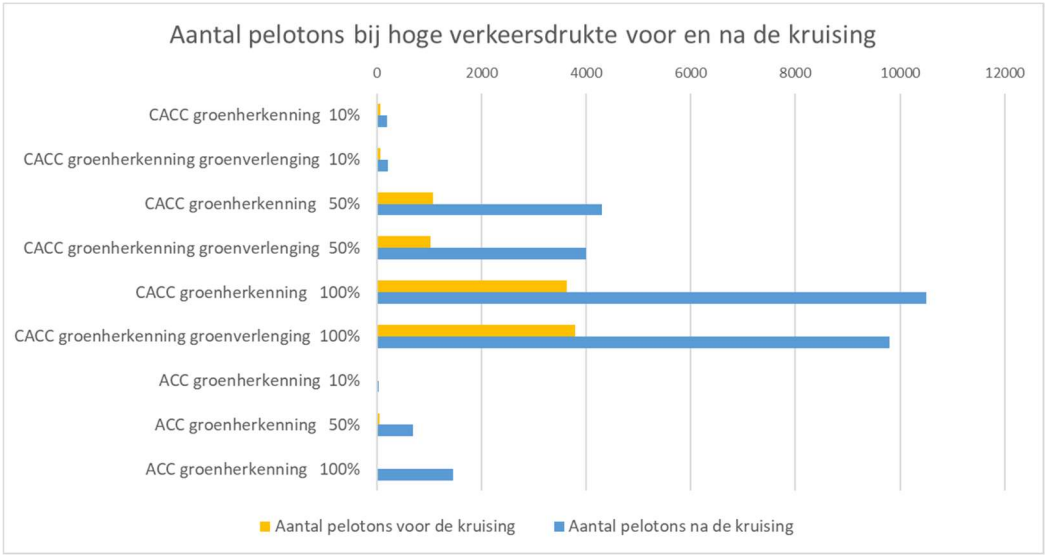
E.3 *Lengte en aantal van de pelotons*

In Figuur E.8 en Figuur E.10 staat de gemiddelde peloton lengte voor en na de kruising in respectievelijk druk en rustig verkeer, en in Figuur E.9 en Figuur E.11 het aantal pelotons voor en na de kruising in respectievelijk druk en rustig verkeer.

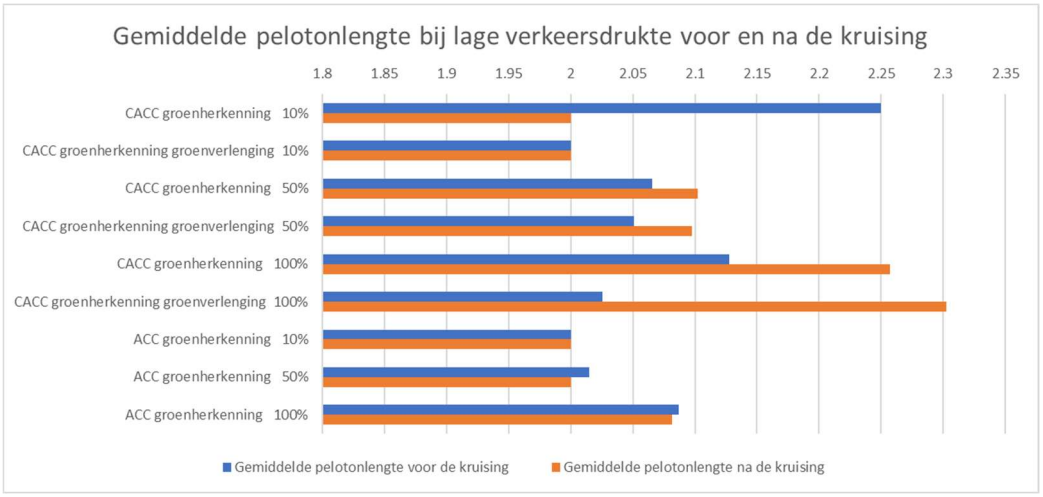
E.3.1 Lengte en aantal van pelotons voor en na een kruising



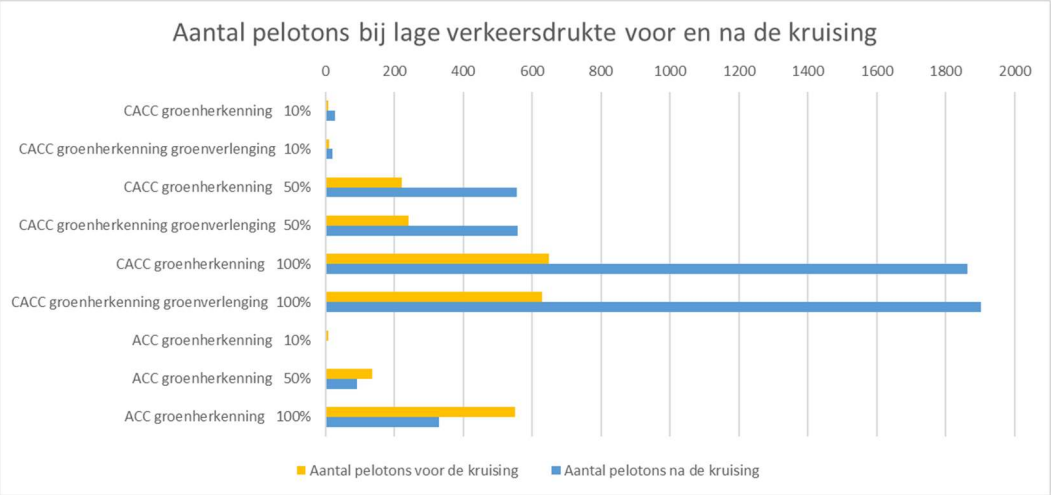
Figuur E.8 pelotonlengte voor en na een kruising in druk verkeer



Figuur E.9 aantal pelotons voor en na een kruising in druk verkeer



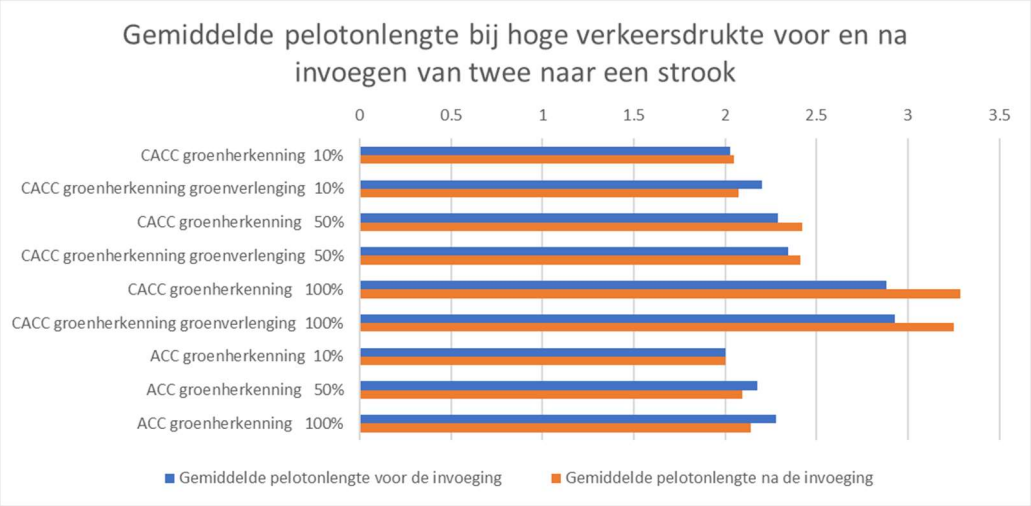
Figuur E.10 pelotonlengte voor en na een kruising in rustig verkeer



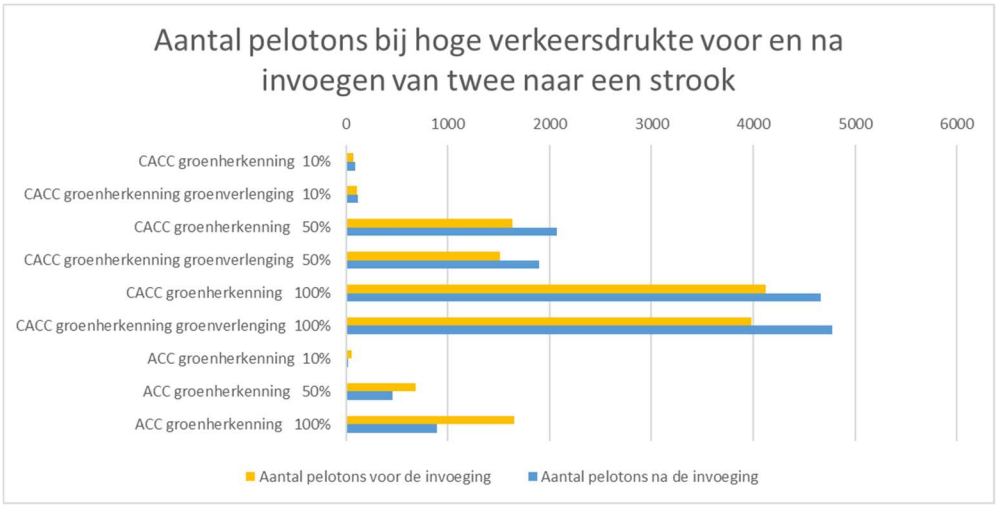
Figuur E.11 aantal pelotons voor en na een kruising in rustig verkeer

E.3.2 Lengte en aantal van pelotons voor en na een invoeging

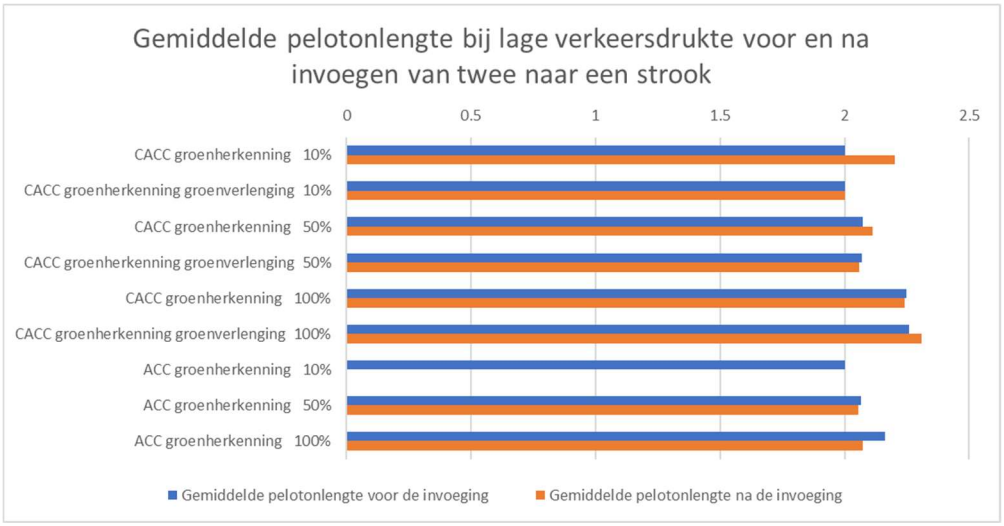
In Figuur E.12, Figuur E.14, Figuur E.16 en Figuur E.18 staat de gemiddelde peloton lengte voor en na de kruising voor verschillende drukteniveaus en invoeg situaties. Figuur E.13, Figuur E.15, Figuur E.17 en Figuur E.19 illustreren het aantal pelotons voor en na de kruising voor verschillende drukteniveaus en invoegsituaties.



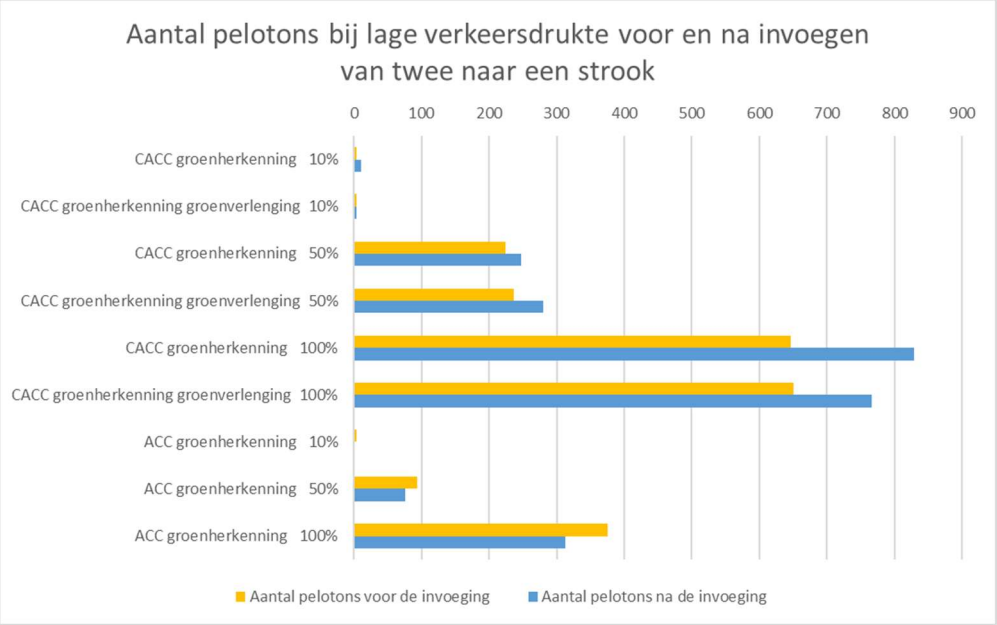
Figuur E.12 pelotonlengte voor en na een invoeging van twee naar een strook in druk verkeer



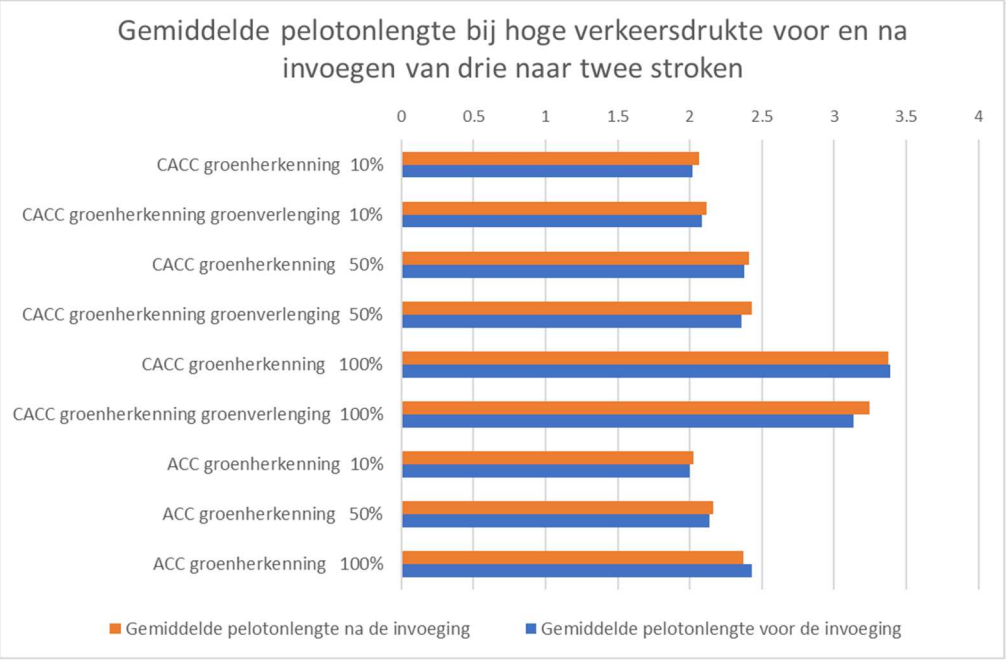
Figuur E.13 aantal pelotons voor en na een invoeging van twee naar een strook in druk verkeer



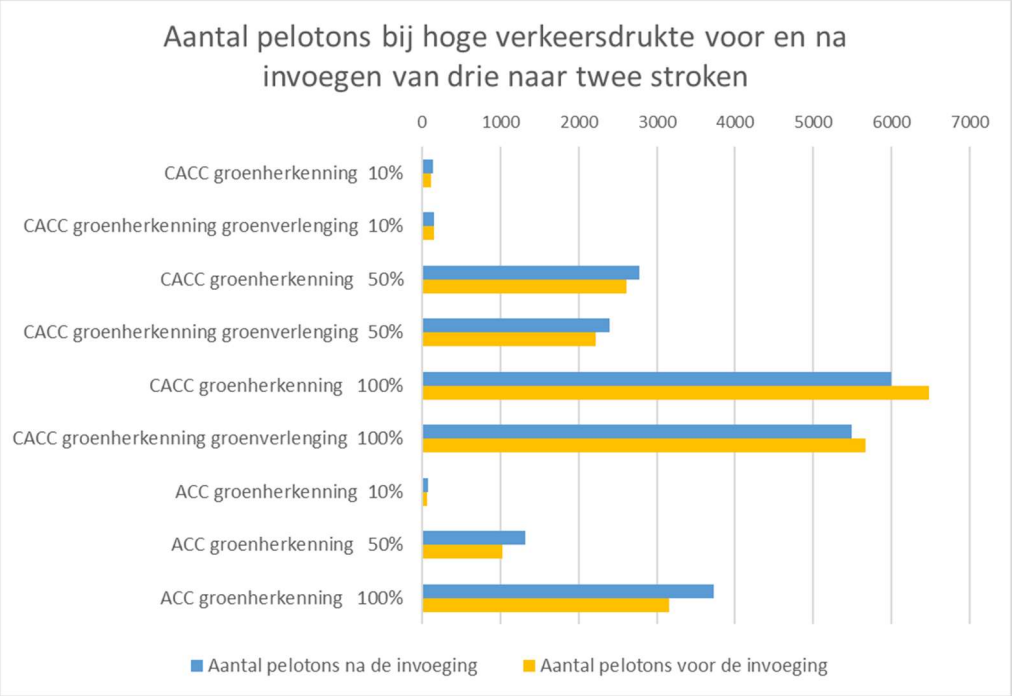
Figuur E.14 pelotonlengte voor en na een invoeging van twee naar een strook in rustig verkeer



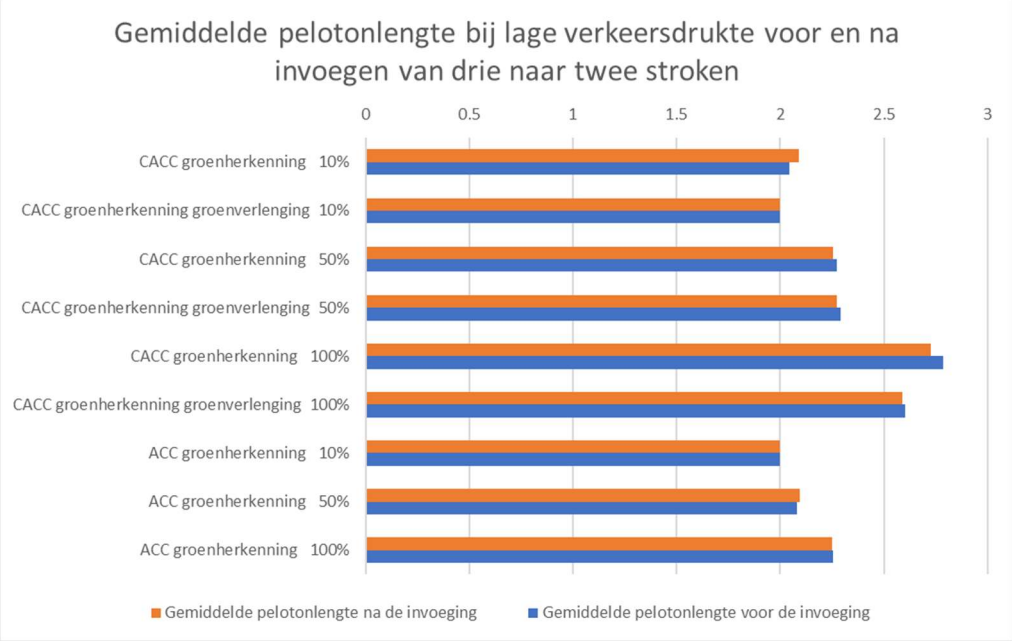
Figuur E.15 aantal pelotons voor en na een invoeging van twee naar een strook in rustig verkeer



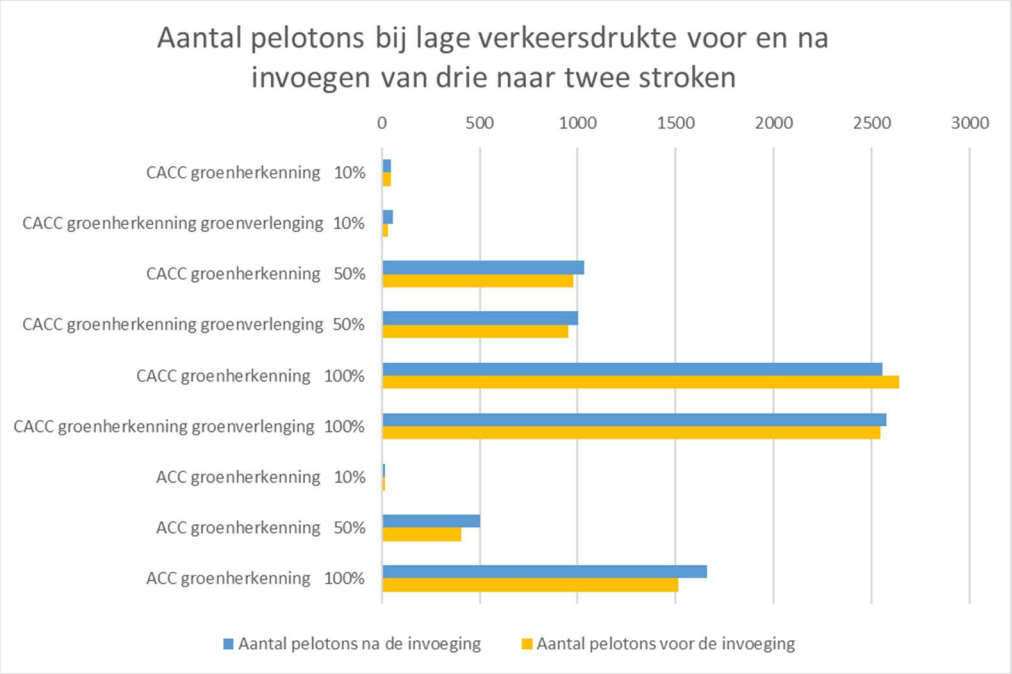
Figuur E.16 pelotonlengte voor en na een invoeging van drie naar twee stroken in druk verkeer



Figuur E.17 aantal pelotons voor en na een invoeging van drie naar twee stroken in druk verkeer



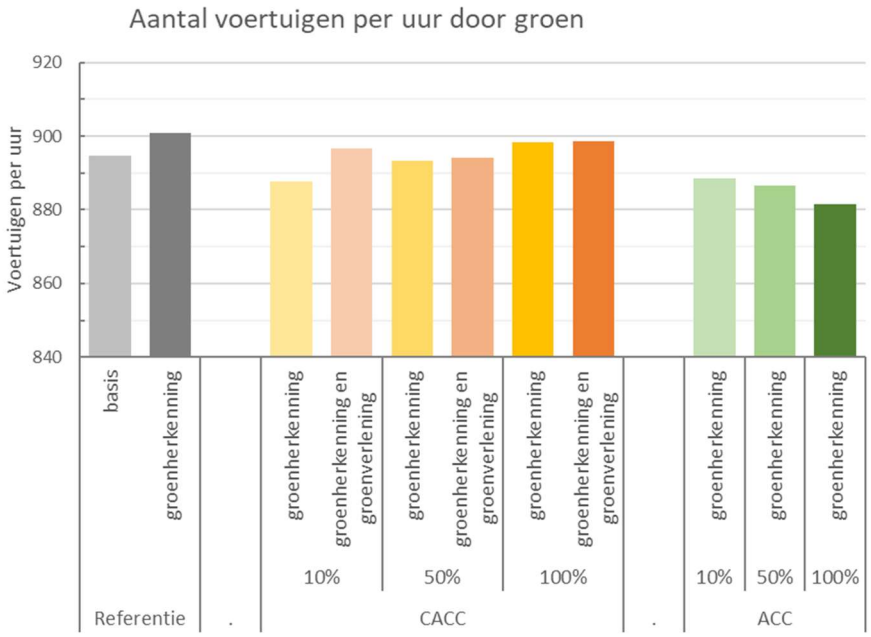
Figuur E.18 pelotonlengte voor en na een invoeging van drie naar twee stroken in rustig verkeer



Figuur E.19 aantal pelotons voor en na een invoeging van drie naar twee stroken in rustig verkeer

E.4 *Aantal voertuigen door een groenfase*

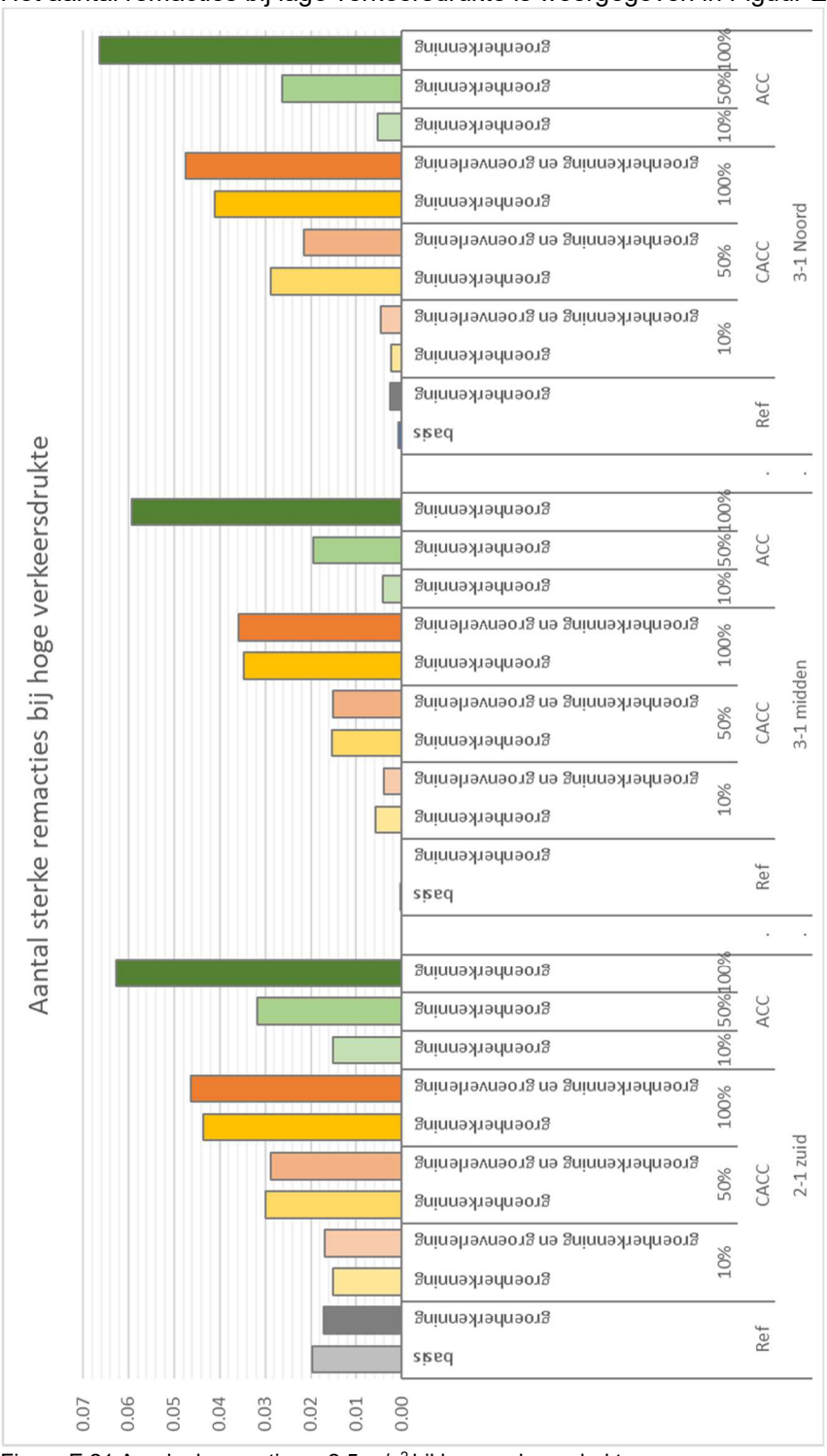
Het aantal voertuigen dat door één groenfase heen kan bij lage verkeerdrukte is weergegeven in Figuur E.20.



Figuur E.20 Aantal voertuigen door groen per uur bij lage verkeersdrukte

E.5 *Aantal remacties*

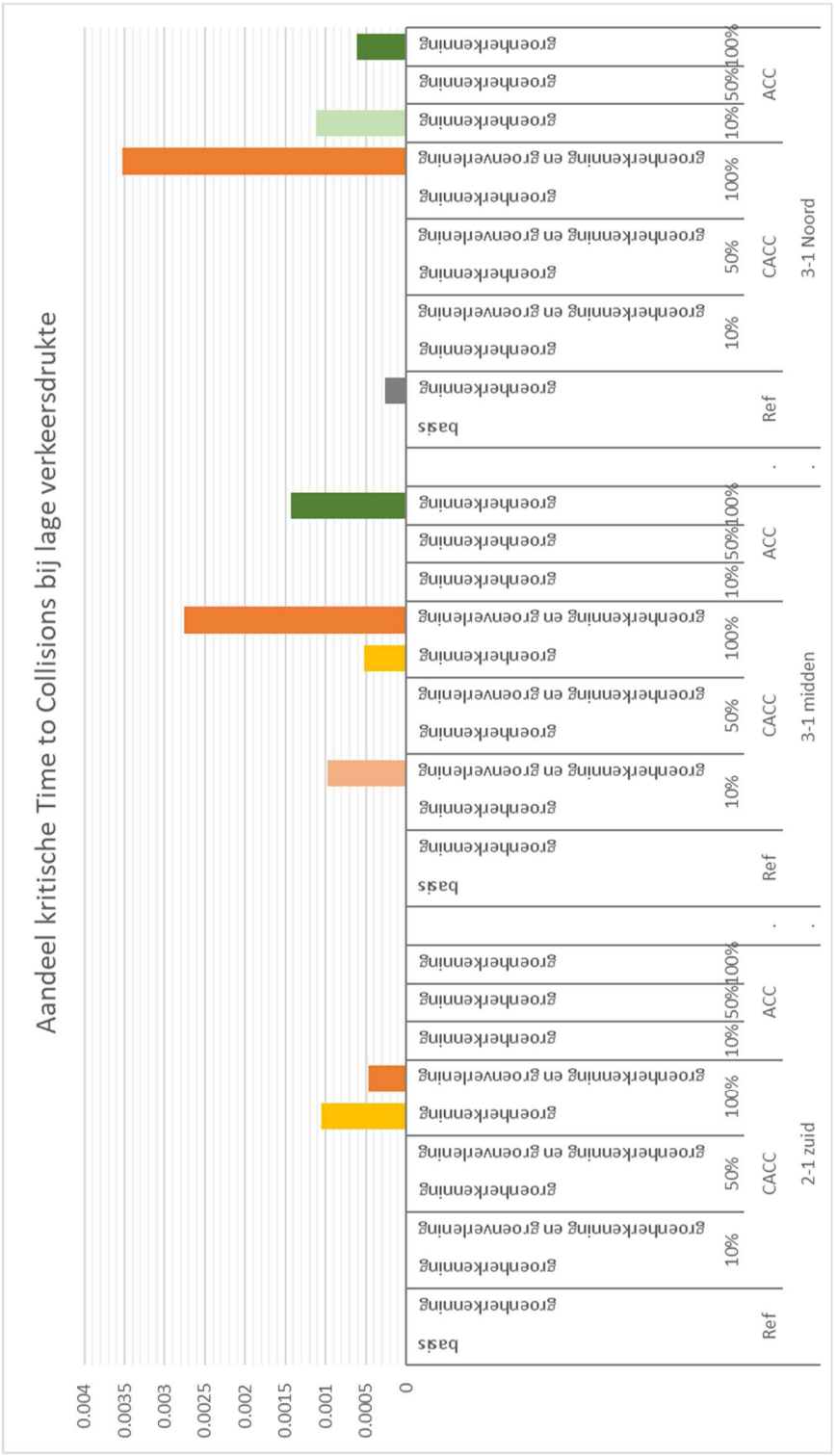
Het aantal remacties bij lage verkeersdrukte is weergegeven in Figuur E.21.



Figuur E.21 Aandeel remacties < 2.5 m/s^2 bij lage verkeersdrukte

E.6 *Time to collision*

De time to collision voor lage verkeersdrukte is weer gegeven in Figuur E.22.



Figuur E.22 Aandeel TTC's < 3 sec bij lage verkeersdrukte

Appendix F: Opschalingsmethode en lijst met geselecteerde kruispunten voor de opschaling

Eerst is nagegaan welke wegen in de provincie Noord-Holland relevant zijn qua verkeersdrukte. Aangezien de effecten het grootst zijn bij hoge verkeersdrukte, zijn alleen de wegen die druk genoeg zijn, van belang. Hiervoor is gebruik gemaakt van de rapportage “Een uitstekend netwerk - Investeringsstrategie Noord-Hollandse Infrastructuur” van de PNH. Deze rapportage bevat de investeringsstrategie van de provincie betreffende het provinciale wegennet. Hierin zijn alle provinciale wegen geclassificeerd volgens een bepaalde ranking naar prioriteit voor deze investeringsstrategie. Deze categorieën zijn gebaseerd op indicatoren zoals verkeersvolume, leefbaarheid en verkeersveiligheid. Alle provinciale wegen zijn gerangschikt op basis van deze indicatoren, waaruit een top 20 van knelpunten is afgeleid. Alle wegen die in de top van deze ranking voorkwamen, zijn gebruikt voor het bepalen van de kruisingen voor de opschaling.
Er waren geen gedetailleerde data beschikbaar over deze kruisingen. Daarom zijn alle kruisingen (handmatig) opgezocht in Google Maps en het aantal stroken per richting en de snelheidslimiet gedocumenteerd. Vervolgens zijn ze geclassificeerd op basis van het aantal stroken en de geschatte verkeersvraag. Het aantal voorsorteerstroken is hierbij aangenomen als representatief voor het verkeersvolume van de kruising. Hieruit hebben we zes categorieën afgeleid, die ook zijn te matchen met de kruisingen in de simulaties.

De zes geïdentificeerde categorieën van kruisingen, zijn:

1. T-splitsing met totaal aantal voorsorteerstroken <= 6
2. T-splitsing met totaal aantal voorsorteerstroken > 6 en <=9
3. T-splitsing met totaal aantal voorsorteerstroken > 9
4. Vierweg kruising met totaal aantal voorsorteerstroken <= 9
5. Vierweg kruising met totaal aantal voorsorteerstroken > 9 en <= 15
6. Vierweg kruising met totaal aantal voorsorteerstroken > 15

Voor elk van deze categorieën is er ook minstens een overeenkomende kruising in het simulatienetwerk.

Voor schatting van het verkeersvolume is gebruik gemaakt van verkeersgegevens van de provincie Noord-Holland en van het NDW. Deze gegevens bevatten het totale verkeersvolume van een gemiddelde dag, totaal voor beide richtingen, voor verschillende provinciale wegen. De vertaling van het gemiddelde totale verkeersvolume van de dag naar de piek en daluren op de kruispunten gebeurt door het maken van een aantal onderbouwde aannames.

De lijst met geselecteerde kruispunten voor de opschaling met bijbehorende kenmerken wordt hieronder weergegeven:

Tabel F.1 : Lijst met geselecteerde kruispunten voor opschaling

nr	Wegnaam	Wegnummer	iNHi rangorde	Totaal aantal stroken richting de kruising	Totaal aantal voorsorteer-stroken	Geschat verkeers-volume	Categorie
1	N250	N250	8	9	11	2410	B.2
2	N250 - N	N250	8	10	10	2848	B.2
3	N250 - N	N250	8	4	4	2748	A.1
4	N250 - N	N250	8	8	8	2782	B.1
5	N242-E	N242	10	8	8	6129	B.1
6	N242-E	N242	10	6	8	4044	A.2
7	N504-E	N504	10	6	6	1843	B.1
8	N504-E	N504	10	8	8	1886	B.1
9	N504-E	N504	10	8	8	1843	B.1
10	N504-E	N504	10	12	14	1886	B.2
11	N242-N	N242	14	6	6	6057	A.1
12	N242-N	N242	14	6	8	6129	A.2
13	N242-N	N242	14	6	8	6201	A.2
14	N242-N	N242	14	12	18	6417	B.3
15	N508-E	N508	18	11	16	4041	B.3
16	N508-E	N508	18	9	12	3996	B.2
17	N508-E	N508	18	11	14	3996	B.2
18	N508	N508	18	6	13	3269	A.3
19	N245-N	N245	18	12	16	2588	B.3
20	N245-N	N245	18	10	13	2530	B.2
21	N245-N	N245	18	10	12	2530	B.2
22	N245-N	N245	18	12	14	2530	B.2
23	N245-N	N245	18	10	10	2473	B.2
24	N245-N	N245	18	9	9	2473	B.1
25	N245-N	N245	18	8	10	2530	B.2
26	N245-N	N245	18	10	10	2473	B.2
27	N245-N	N245	18	10	10	2473	B.2
28	N245-N	N245	18	11	11	2473	B.2
29	N245-N	N245	18	8	8	2473	B.1
30	N242-ramp-E	N242	6	12	16	1514	B.3
31	N242-ramp-W	N242	6	12	14	883	B.2
32	N246	N246	17	8	8	2531	B.1
33	N246-N	N246	17	8	8	3787	B.1

34	N246-N	N246	17	11	13	3920	B.2
35	N246-N	N246	17	12	14	3920	B.2
36	N246-ramp-E	N246	2	6	7	3090	A.1
37	N246-ramp-W	N246	2	6	8	2383	A.2
38	N246-N	N246	2	4	7	3742	A.1
39	N246-N	N246	2	4	6	3831	0
40	N203-E	N203	2	11	13	5367	B.2
41	N203-E	N203	2	8	10	5306	B.2
42	N203	N203	2	6	10	4583	A.2
43	N203-E	N203	2	6	8	5245	A.2
44	N203-E	N203	2	8	10	5367	B.2
45	N516	N516	3	12	17	2078	B.3
46	N516-E	N516	3	10	15	3400	B.2
47	N516-E	N516	9	6	9	3249	A.2
48	N516-E	N516	9	12	16	3324	B.3
49	N247-N	N247	15	7	7	3582	B.1
50	N247-N	N247	15	7	7	3582	B.1
51	N247-N	N247	15	5	5	3498	A.1
52	N247-N	N247	15	6	6	3540	A.1
53	N247-N	N247	15	3	3	3456	A.1
54	N247-N	N247	15	10	10	3582	B.2
55	N247-N	N247	5	10	12	3709	B.2
56	N247-N	N247	5	5	8	3666	A.2
57	N247-N	N247	5	6	12	3709	A.3
58	N247	N247	5	6	13	2104	A.3
59	N525	N525	11	7	7	2356	A.1
60	N525-N	N525	11	8	9	4361	B.1
61	N525-N	N525	11	6	9	4311	A.2
62	N525 - N	N525	11	6	6	2306	A.1
63	N521	N521	19	5	5	1970	A.1
64	N521-N	N521	19	6	6	3598	A.1
65	N207-S	N207	7	6	12	5283	A.3
66	N207-S	N207	7	6	10	5223	A.2
67	N207-E	N207	7	6	10	5223	A.2
68	N207-S	N207	7	6	14	5403	A.3
69	N207-S	N207	7	8	17	5343	B.3
70	N231-N	N231	7	9	9	3120	B.1
71	N231-N	N231	7	7	7	3084	B.1
72	N231-N	N231	7	5	5	3048	A.1
73	N231-N	N231	7	12	17	3157	B.3

74	N231-N	N231	7	9	11	3193	B.2
75	N231-N	N231	7	12	18	3265	B.3
76	N231-N	N231	7	11	16	3193	B.3
77	N231-N	N231	4	6	6	3048	A.1
78	N231-N	N231	4	12	14	3193	B.2
79	N231-N	N231	4	12	16	3229	B.3
80	N231-N	N231	4	5	6	3084	A.1
81	N231-N	N231	4	7	7	3048	B.1
82	N232-N	N232	4	9	11	837	B.2
83	N232-N	N232	13	5	7	1483	A.1
84	N232-N	N232	13	6	11	1535	A.3
85	N232-N	N232	13	7	10	1501	B.2
86	N232-N	N232	13	8	10	1501	B.2
87	N232-N	N232	13	6	8	1483	A.2
88	N232-N	N232	13	6	6	1448	B.1
89	N232-N	N232	13	6	6	1466	A.1
90	N232-N	N232	13	9	11	1483	B.2
91	N232-N	N232	13	5	5	1448	B.1
92	N205-E	N205	12	12	19	2760	B.3
93	N205-E	N205	12	6	10	2698	A.2
94	N201-E	N201	1	6	10	2681	A.2
95	N201-E	N201	1	6	11	2712	A.3
96	N201-E	N201	1	6	12	2712	A.3
97	N201-E	N201	1	6	9	2681	B.1
98	N201-E	N201	1	11	19	2835	B.3
99	N201-ramp-SW	N201	1	6	6	1351	A.1
100	middle	0	1	4	4	1101	A.1
101	middle	0	1	5	5	1101	A.1
102	N201-ramp-NE	N201	1	4	4	1326	A.1
103	N201-N	N201	1	7	11	2712	B.2
104	N201-E	N201	1	12	21	2835	B.3
105	N201-E	N201	1	3	6	1448	0
106	N201-E	N201	1	5	12	1572	A.3

Appendix G: Referenties

Jeroen Ploeg, Bart T. M. Scheepers e.a. *“Design and Experimental Evaluation of Cooperative Adaptive Cruise Control”*, *in* Conference Record - IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems · October 2011

Provincie Noord-Holland. *“Een uitstekend netwerk Investeringsstrategie Noord-Hollandse Infrastructuur een programma voor Doorstroming, Verkeersveiligheid en Leefbaarheid.”* Februari 2014

Zhenlong Li, Baoju Wang, Jiankun Zhang . *“Comparative analysis of drivers' start‐up time of the first two vehicles at signalized intersections”.* Journal of Advanced Transportation, June 2015

Zhenlong Li, Jiankun Zhang, Jian Rong, Jianming Ma, Zebin Guo. *"Measurement and comparative analysis of driver’s perception–reaction time to green phase at the intersections with and without a countdown timer".* Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour Volume 22, January 2014, Pages 50-62