

IVER

Onderzoek detectieconfiguratie en signaalgroepafhandeling

Omdat we ons verplaatsen



adviseurs
mobiliteit
**Goudappel
Coffeng**



adviseurs
mobiliteit

**Goudappel
Coffeng**

IVER

Onderzoek detectieconfiguratie en signaalgroepafhandeling

Datum
Kenmerk
Eerste versie

28 augustus 2018
UTA276/KII/1828.01

Documentatiepagina

Oprachtgever(s)	IVER
Titel rapport	Onderzoek detectieconfiguratie en signaalgroepafhandeling
Kenmerk	UTA276/KII/1828.01
Datum publicatie	28 augustus 2018
Projectteam opdrachtgever(s)	G. van Dijck, E. Greweldinger, J. van Run en M. Bergmans
Projectteam Goudappel Coffeng	L. Krol, L. Prinsen, en L. Misdom (Vialis)

Inhoud	Pagina
Samenvatting	1
1 Inleiding	7
2 Onderzoeksvragen en onderzoeksopzet	8
2.1 Probleemstelling en onderzoeksvragen	8
2.2 Onderzoeksopzet	9
2.3 Afbakening	9
3 Literatuuronderzoek	10
3.1 Huidige IVER-document	10
3.2 Alternatief detectieveld: Groen op Maat (GOM)	11
3.3 Onderzoeken rondom verkeerslichten	12
3.4 CROW-richtlijnen	14
3.5 Buitenlandse literatuur	15
3.6 Conclusies literatuurstudie	16
4 Theoretisch kader - mechanica	17
4.1 Afwikkeling eerste voertuigen in de wachtrij	17
4.2 Afwikkeling voertuigen op snelheid	20
4.3 Mechanicamodel	25
4.4 Invulling detectieveld	25
4.5 Instellingen van de hiaattijden	29
4.6 Effect op vrachtverkeer	32
4.7 Fietsverkeer	32
4.8 Kwalitatieve vergelijking detectievelden	34
4.9 Conclusie	35
5 Veldonderzoek - data-analyse	37
5.1 Onderzoeksopzet	37
5.2 Onderzoekslocaties	38
5.3 Resultaten kruispunten 's-Hertogenbosch	38
5.4 Resultaten kruispunten provincie Utrecht	39
5.5 Conclusie	44
6 Simulaties	45
6.1 Vertaling mechanica naar simulaties	45
6.2 Resultaten detectieveld	46
6.3 Conclusies	51
7 Signaalgroepafhandeling	52
7.1 Groenaanvraag	53
7.2 Vasthouden verlenggroen	53
7.3 Vasthouden meeverlenggroen	54

	Inhoud (vervolg)	Pagina
8	Contractdocumenten	56
9	Conclusies en aanbevelingen	57
9.1	Conclusies	57
9.2	Resulterende detectieveld	59
9.2.1	Gemotoriseerd verkeer	59
9.2.2	Fietsverkeer	60
10	Literatuurlijst	62
	Bijlagen	
1	Onderzoeksvragen	
2	Instelling theoretische hiaattijden	
3	Onderzoekslocaties	

Samenvatting

In 2002 is door de IVER een document gepubliceerd, waarin een standaard detectieconfiguratie is beschreven. De IVER heeft recentelijk besloten tot een update van het document. De werkgroep heeft Goudappel Coffeng BV in combinatie met Vialis opdracht gegeven de benodigde werkzaamheden hiervoor uit te voeren.

De doelstelling van dit onderzoek is om op goed onderbouwde wijze te komen tot een actualisatie van het stuk 'Detectieconfiguratie en signaalgroepafwikkeling IVER', zodat het document bruikbaar blijft in de toekomst. Een belangrijk nevendoeel is een verbetering van de bruikbaarheid van het stuk als basis voor contracten.

Het ontwikkelde detectieveld is gebaseerd op een theoretisch model en getoetst in een simulatieomgeving. Het aanleggen van een detectieveld en de instellingen van de detectielussen is *altijd* maatwerk. Waar nodig moet worden afgeweken van deze nieuwe detectievelden.

Onderzoeksopzet

De centrale doelstelling van het project is:

Wat moet aan het stuk 'IVER detectieconfiguratie en signaalgroepafwikkeling' aangepast worden, zodat de detectieconfiguratie voor auto en fiets veiliger en de signaalgroepafwikkeling optimaler functioneert en tevens het stuk 'IVER detectieconfiguratie en signaalgroepafwikkeling' functioneel bruikbaar is als onderdeel in realisatiecontracten?

De onderzoeksvragen zijn beantwoord op basis van vier onderzoeksonderdelen: literatuur, mechanica, data-analyse (VRI-data en simulatiedata) en contractvorming.

Onderzoeksresultaten

Literatuurstudie

Vanuit het literatuuronderzoek zijn drie aspecten naar voren gekomen die van belang zijn voor de bepaling van het detectieveld, allereerst de functie van het detectieveld. Hierbij worden drie functies onderscheiden. Deze zijn het aanvragen van groen en het verlengen van het groen. Daarnaast heeft het detectieveld een functie voor het tellen van voertuigen.

Een tweede aspect is dat het detectieveld moet kunnen omgaan met zowel stilstaande als rijdende voertuigen. Uit onderzoek blijkt dat het een tijd duurt voordat een wachtrij op snelheid is. Het detectieveld moet goed met deze situatie kunnen omgaan. Daarnaast geldt echter dat tijdens de groenfase verkeer op snelheid kan aankomen. Wanneer dit verkeer tijdig wordt gedetecteerd, kan het goed afgewikkeld worden en kan, bij geelsturing, een zo gunstig mogelijk moment gekozen worden.

Het laatste aspect betreft de rekenparameters. Het huidige detectieveld is gebaseerd op parameters die afwijken van de waarden die uit andere onderzoeken blijken. De belangrijkste parameters zijn, naast de snelheid, de reactietijd en de afremvertraging. Voor het nieuwe detectieveld zijn waarden gekozen van 1 seconde voor de reactietijd en $2,8 \text{ m/s}^2$ voor de afremvertraging.

Mechanica

Gemotoriseerd verkeer

Om voertuigen op snelheid tijdig duidelijkheid te geven over het al dan niet groen worden én om veilig en efficiënt het verkeer af te wikkelen, zijn drie detectiepunten bepaald: het punt van aanvragen, het verlenggebied en het punt waarop geelsturing plaatsvindt. Het ontworpen detectieveld sluit aan bij deze punten.

Het deel van het detectieveld net stroomopwaarts van de stopstreep is voor alle snelheden gelijk, omdat de afwikkeling van het eerste deel van een wachtrij onafhankelijk is van de maximumsnelheid.

In het detectieveld zijn de tussenruimten, op een enkele uitzondering na, rond de 10 tot 13 meter. Hierdoor neemt de kans dat vrachtverkeer gevangen wordt, sterk af.

De verkeersregeling moet in staat zijn om aflopende hiaattijden te ondersteunen en om direct te kunnen overspringen naar het scenario, waarbij het verkeer op snelheid is. Door op alle lussen de mogelijkheid te creëren om dynamische hiaattijden gedurende een beperkte tijd toe te passen, kan op straat goed bijgestuurd worden.

Fietsverkeer

Voor de detectie van fietsverkeer is onderscheid gemaakt naar snelheid. Binnenstedelijk, met snelheden tot 6 meter per seconde is detectie op de stopstreep en op 21 meter nodig.

Buiten de kom, waar de snelheden hoger liggen, moet het groen eerder aangevraagd worden en is het verlenggebied groter. Wanneer alleen rekening wordt gehouden met e-bikes (7 m/s) volstaat het om de verweglus op te schuiven tot 25 meter en de hiaattijd te verhogen. Wanneer ook de bromfiets (11 m/s) gefaciliteerd moet worden, is het toepassen van een extra verweglus noodzakelijk. De verweglussen komen dan op 15 en 32 meter te liggen.

Bij grote aantallen fietsers, bijvoorbeeld op school- of snelfietsroutes, is het wenselijk om een extra lus op 7 meter toe te passen, zodat niet onnodig doorverlengd hoeft te worden op de koplus. Als er net stroomopwaarts van de koplus een afslagmogelijkheid is, moet er over nagedacht worden waar deze lus exact komt te liggen en hoe deze lus ingesteld wordt.

Als er sprake is van een fietspad in twee richtingen, moet worden nagedacht over richtingsgevoelige lussenparen of het gebruik van radardetectie om onterechte detectiemeldingen te voorkomen.

Data-analyse

Op een viertal kruispunten is onderzoek gedaan naar de effecten van het punt waarop het groen wordt aangevraagd en verlengd. Op de twee kruispunten in 's-Hertogenbosch kunnen de gevonden verschillen niet worden toegeschreven aan één specifieke wijziging. De verandering van de vormgeving van de kruispunten leidt tot verandering van verkeersstromen en de verandering van de regeling heeft eveneens effect op de afwikkeling van het verkeer. Het is voor deze kruispunten niet mogelijk om het effect van een ander detectieveld te beoordelen.

Uit de analyse van de twee Utrechtse kruispunten, waar de toegestane snelheid 80 km/h is, blijkt dat de roodlichtnegatie en het aantal verkeersonveilige situaties afneemt, door de aanvraag- en verlengfunctie op 114 meter in te schakelen. Het inschakelen van de aanvraag- en verlengfunctie heeft geen duidelijk effect op de verkeersafwikkeling.

Simulaties

Het ontwikkelde detectieveld blijkt in de simulatie goed te presteren. Wanneer het verkeer vanuit stilstand vertrekt, is de regeling goed in staat hierop te acteren, door het gebruik van dynamische hiaattijden. Ook het moment van geelsturing is beter te beïnvloeden, waardoor de benutte geeltijd constanter en daarmee veiliger wordt.

De winst van het nieuwe detectieveld ontstaat enerzijds bij wachtrijen tot vier voertuigen. Door een tweede lus op 12 meter toe te passen, is de groentijd korter en de benutte geeltijd hoger. Dit zorgt voor een winst van maximaal 3 seconden per cyclus. Bij wachtrijen van 5 of 6 voertuigen is de benutte geeltijd in het oude IVER-detectieveld relatief hoog. In het nieuwe detectieveld is de geelbenutting bij dergelijke wachtrijen iets lager. Hierdoor verbetert de verkeersveiligheid.

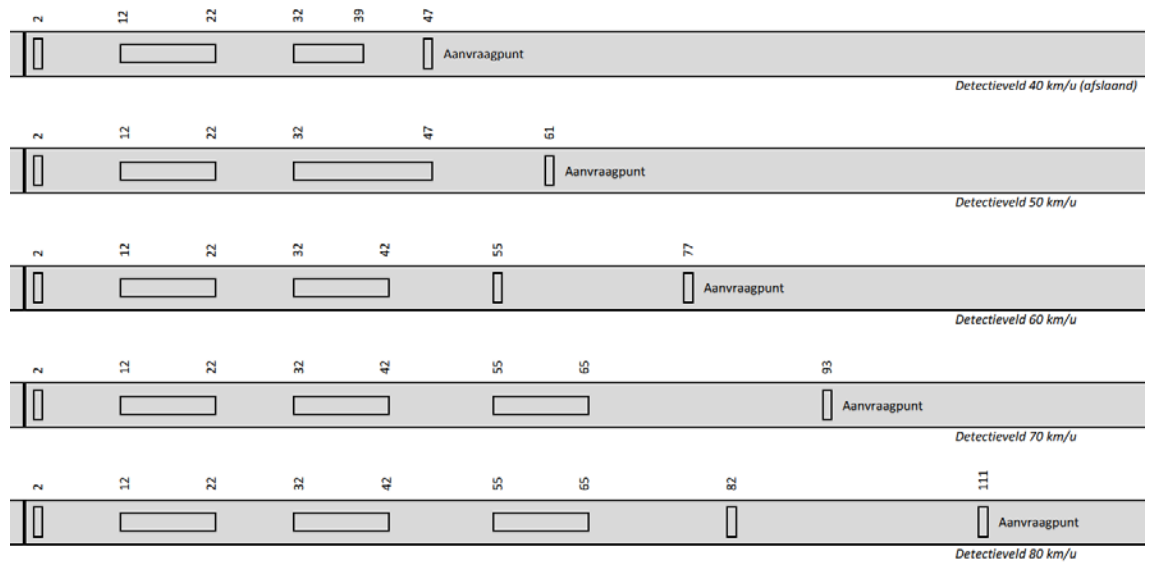
Daarnaast is er een verbetering voor de afwikkeling van verkeer dat op snelheid komt aanrijden. Door toepassing van dynamische hiaattijden en lussen vroegtijdig uit te schakelen, ontstaat een hogere geelbenutting van 0,5 seconde bij 60 km/h tot 1,5 seconde bij 80 km/h.

De afwikkeling van vrachtverkeer verloopt beter met het nieuwe detectieveld. Doordat vrachtverkeer vrijwel continu een van de verlenglussen bezet, kunnen vrachtwagens goed afgewikkeld worden.

Resulterende detectieveld

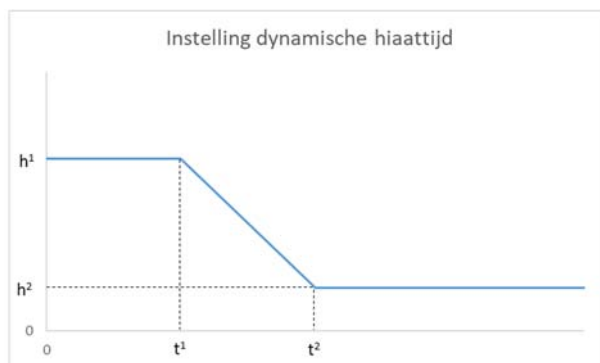
Gemotoriseerd verkeer

In figuur 0.1 is het detectieveld weergegeven voor het gemotoriseerde verkeer. De figuur geeft enkel de positie van de detectielocatie weer; de keuze van het detectiemiddel (massadetectie, radar) en van de vormgeving van de detectielussen (recht, schuin etc.) staat vrij.



Figuur 0.1: Ontworpen detectievelden gemotoriseerd verkeer

De hiaattijden van de detectielussen zijn dynamisch. Dat betekent dat de hiaattijd in de loop van de groenfase wijzigt. In figuur 0.2 is weergegeven hoe deze tijden aflopen. De tijdstellingen zijn weergegeven in tabel 0.1. Als er aan het begin van de groenfase op de af te schakelen lussen geen verkeer is, moet direct overstapt worden op de tweede hiaattijd.



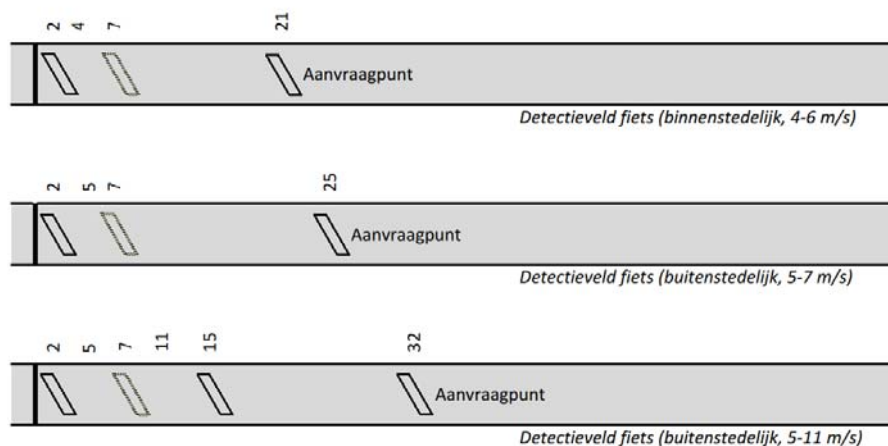
Figuur 0.2: Schematische weergave aflopende hiaattijden

snellheid	detector	begin (m)	eind (m)	t1 (sec.)	t2 (sec.)	h1 (sec.)	h2 (sec.)	maximum (sec.)
40 km/h	d1	1	2	-	-	0,0	0,0	8
	d2	12	22	-	-	0,1	0,1	-
	d3	32	39	-	-	1,5	1,5	-
	d4	46	47	-	-	1,0	1,0	-
50 km/h	d1	1	2	-	-	0,0	0,0	8
	d2	12	22	-	-	0,1	0,1	10
	d3	32	47	10	22	2,0	0,7	-
	d4	60	61	-	-	2,5	2,5	-
60 km/h	d1	1	2	-	-	0,0	0,0	8
	d2	12	22	-	-	0,1	0,1	10
	d3	32	42	10	20	2,0	0,3	-
	d4	55	56	-	-	1,5	1,5	-
	d5	76	77	-	-	2,5	2,5	-
70 km/h	d1	1	2	-	-	0,0	0,0	8
	d2	12	22	-	-	0,1	0,1	10
	d3	32	42	12	20	1,5	0,0	25
	d4	55	65	15	30	3,5	1,0	-
	d5	92	93	-	-	2,5	2,5	-
80 km/h	d1	1	2	-	-	0,0	0,0	8
	d2	12	22	-	-	0,1	0,1	10
	d3	32	42	12	20	1,0	0,0	20
	d4	55	65	15	30	1,5	0,5	-
	d5	82	83	20	40	3,0	1,0	-
	d6	110	111	-	-	2,0	2,0	-

Tabel 0.1: Instellingen tijdselementen van detectielussen gemotoriseerd verkeer

Fietsverkeer

In figuur 0.3 is het detectieveld weergegeven voor het (brom)fietsverkeer. De figuur geeft enkel de positie van de lussen weer; de keuze van het detectiemiddel (massa-detectie, radar) en van de vormgeving van de detectielussen (recht, schuin etc.) staat vrij. De bijbehorende tijdselementen zijn weergegeven in tabel 0.2.



Figuur 0.3: Ontworpen detectieveld (brom)fietsers

snelheid	detector	begin (m)	eind (m)	hiaattijd (sec.)	maximum (sec.)
binnenstedelijk (4-6 m/s)	d1	1	1,5	0,0	8
	d2	6,5	7	0,5	-
	d3	20,5	21	3,0	-
buitenstedelijk fiets (5-7 m/s)	d1	1	1,5	0,0	8
	d2	6,5	7	0,5	-
	d3	24,5	25	3,3	-
buitenstedelijk bromfiets (5-11 m/s)	d1	1	1,5	0,0	8
	d2	6,5	7	0,0	-
	d3	14,5	15	1,2	-
	d4	31,5	32	3,0	-

Tabel 0.2: Instellingen tijdselementen van detectielussen fietsverkeer

1

Inleiding

Het IVER-stuk signaalgroepafwikkeling en detectieconfiguratie is in de periode 1997-2001 tot stand gekomen. Het is gepubliceerd op 31 januari 2002 en sindsdien breed bekend geraakt als de IVER-detectieconfiguratie. Het stuk wordt regelmatig gebruikt door wegbeheerders en aannemers en heeft ertoe geleid dat het standaarddetectieveld van veel wegbeheerders een ruimere en kwalitatief betere opzet heeft gekregen.

Inmiddels is het stuk meer dan vijftien jaar oud. Efficiënte en verkeersveilige verkeersregelingen worden steeds belangrijker en verdieping van inzichten maken een actualisatie van het stuk zinvol. In de IVER-vergadering van 4 april 2017 is besloten tot de vorming van een werkgroep om op korte termijn een update van het stuk te realiseren. De werkgroep heeft Goudappel Coffeng in combinatie met Vialis opdracht gegeven de benodigde werkzaamheden hiervoor uit te voeren.

Het uitgevoerde onderzoek richt zich op een update van het bestaande stuk. De basis voor het onderzoek is het gebruik van massadetectie voor gemotoriseerd verkeer en fietsers. C-its-ontwikkelingen met floating car data vallen niet onder de scope van het onderzoek. Desondanks kunnen de resultaten ook worden gebruikt voor andere detectievormen en geven ze inzicht in hoe om te gaan met floating car data.

De doelstelling van dit onderzoek is op goed onderbouwde wijze te komen tot een actualisatie van het stuk 'Detectieconfiguratie en signaalgroepafwikkeling IVER', zodat het document bruikbaar blijft in de toekomst. Een belangrijk nevensdoel is een verbetering van de bruikbaarheid van het stuk als basis voor contracten.

2

Onderzoeksvragen en onderzoeksopzet

2.1 Probleemstelling en onderzoeksvragen

In de offerteaanvraag voor het onderzoek is de hiernavolgende probleemstelling met bijbehorende onderzoeksvragen opgenomen (*cursief* weergegeven). De onderzoeksvragen zijn opgenomen in bijlage 1.

Vernieuwing van de IVER-detectieconfiguratie dient zich op de volgende zaken te richten (uit de probleembeschrijving):

- *In bijlage 'Tabel beslissingsafstanden' is een rekenmethode gegeven voor de juiste ligging van de lussen op basis van de werkelijk gereden snelheid, zeg maar de V85. In de praktijk wordt echter zelden daadwerkelijk gerekend aan de positie van de lussen. In contracten wordt dit vaak ook niet hard voorgeschreven aan de hand van het huidige stuk.*
- *Het stuk is als bijlage in contracten onvoldoende accuraat om te krijgen wat de wegbeheerder in gedachten heeft.*
- *Uit ontwikkelingen zoals Groen op Maat, blijkt dat een andere detectieconfiguratie de afwikkeling positief kan bevorderen.*
- *Uit het onderzoek 'Geeltijden (IVER/Goudappel 2016)' is gebleken dat de IVER-detectieconfiguratie de dilemmazone niet geheel afdekt en een veilige geelsturing niet altijd garandeert.*

Dit is te herleiden tot de volgende probleemstelling:

Wat moet aan het stuk 'IVER detectieconfiguratie en signaalgroepafwikkeling' aangepast worden, zodat de detectieconfiguratie voor auto en fiets veiliger en de signaalgroepafwikkeling optimaler functioneert en tevens het stuk 'IVER detectieconfiguratie en signaalgroepafwikkeling' functioneel bruikbaar is als onderdeel in realisatiecontracten?

2.2 Onderzoeksopzet

De door IVER opgestelde onderzoeksvragen zijn beantwoord op basis van de volgende vier onderzoeksonderdelen:

1. Vanuit de 'literatuur': Wat is er aan kennis beschikbaar, in binnen- en buitenland? Welke raakvlakken zijn van belang? Welke (technologische) ontwikkelingen zijn van invloed? De literatuurstudie is input voor de andere drie onderzoeksonderdelen: mechanica, big data en contractvorming. Het resultaat van de literatuurstudie is opgenomen in hoofdstuk 3.
2. Vanuit de 'mechanica': Hoe kunnen we een optimaal detectieveld bepalen, rekening houdend met locatiespecifieke kenmerken? Het resultaat van dit onderdeel is opgenomen in hoofdstuk 4.
3. Vanuit de 'big data': Welke effecten hebben verschillende keuzes bij een detectieveld, zowel in de praktijk (op basis van VRI-data) als in een simulatieomgeving (microsimulatiemodel)? Het resultaat van dit onderdeel is opgenomen in de hoofdstukken 5 (praktijk) en 6 (simulatie). Op basis van de resultaten van de eerste drie onderzoeksonderdelen (literatuur, mechanica en big data) is in hoofdstuk 7 het effect op de signaalgroepafhandeling beschreven.
4. Vanuit de 'contractvorming': Wat kan verbeterd worden aan de documentatie, zodat het bruikbaar is in contractstukken? Het resultaat van dit onderdeel is opgenomen in hoofdstuk 8.

De conclusies en aanbevelingen van het onderzoek zijn opgenomen in hoofdstuk 9.

2.3 Afbakening

In dit onderzoek valt een aantal aspecten expliciet buiten de scope. Het betreft de volgende onderdelen:

- Detectiemethode: in het onderzoek is bepaald wat de gebieden zijn waarin voertuigen gedetecteerd moeten worden. Hierbij is expliciet niet gezegd hoe ze gedetecteerd moeten worden. Hiervoor zijn verschillende methoden, zoals massa-, radar-, video- of infrarooddetectie.
- Vorm van detectielussen: de vorm van de detectielussen (breed, smal, schuin, recht etc.) valt buiten de scope. In het onderzoek is verondersteld dat op de genoemde punten voertuigen worden gedetecteerd, maar niet hoe dat moet. Ook is in het onderzoek geen rekening gehouden met het missen van voertuigen op detectiepunten. In het Handboek aanleg verkeersregelininstallaties (CROW, 2009) is meer informatie te vinden over dit onderwerp.
- Detectiebewaking en detectiefouten: het functioneren van het detectieveld hangt af van de mate waarin de regeling detectiefouten herkent en hierop inspeelt. Binnen dit onderzoek is hiermee echter geen rekening gehouden.
- Voertuigafhankelijk geel: Er is geen rekening gehouden met het eventueel toepassen van voertuigafhankelijk geel. Uitgangspunt is dat de geeltijd een vaste waarde heeft.

3

Literatuuronderzoek

Het eerste onderdeel van het onderzoek is de uitgevoerde literatuurstudie. In het literatuuronderzoek zijn de volgende onderwerpen gevonden die van belang worden geacht voor het onderzoek naar de detectieconfiguratie:

- IVER-detectiestandaard.
- Documentatie Groen op Maat (GOM).
- Onderzoeken naar specifieke onderdelen verkeerslichtenregelingen:
 - Onderzoek afwikkeling van het eerste deel van de wachtrij.
 - Onderzoek geeltijden.
 - Onderzoek ontruimingstijden.
 - Onderzoek wachtstand.
- CROW-documentatie:
 - Handboek Verkeersregelingen 2014.
 - Handboek aanleg verkeersregelininstallaties 2009.
- Buitenlandse documentatie.

De hiervoor genoemde onderwerpen zijn in de hiernavolgende paragrafen nader beschreven.

3.1 Huidige IVER-document

In 2002 is de huidige richtlijn voor signaalgroepafwikkeling en detectieconfiguratie gereedgekomen (IVER, 2001). Dit document is voor veel wegbeheerders het uitgangspunt voor de manier waarop verkeer afgehandeld wordt bij verkeerslichten. De twee centrale thema's zijn de signaalgroepafwikkeling en de detectiezones.

Signaalgroepafwikkeling

Voor de signaalgroepafwikkeling worden verschillende fasen tijdens het groen, geel en rood onderscheiden. De groenfase kent een aantal verschillende stappen. Globaal kan dit opgedeeld worden in de afwikkeling van de wachtrij (VG, VAG1, VAG2), het verlengen voor verkeer dat tijdens groen komt aanrijden (WG, VAG3, MVG) en veiligheidsgroen (VAG4). Deze verschillende fasen van het groen zijn in de richtlijn het uitgangspunt voor de bepaling van het detectieveld.

De geelfase wordt onderverdeeld in twee fasen (vastgeel en voertuigafhankelijk geel); in de praktijk wordt het voertuigafhankelijke geel weinig toegepast. De roodfase wordt eveneens in twee stappen opgedeeld (wachtrood en rood voor groen).

Detectiezones

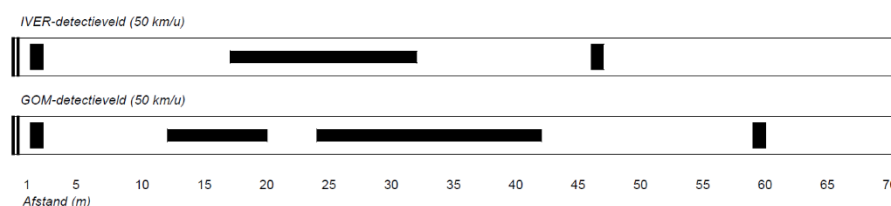
De verschillende groenfasen zijn tijdsgebonden elementen. Dat wil zeggen dat ze in de verkeersregeling een tijdswaarde krijgen (statisch of dynamisch). Het detectieveld zelf ligt daarentegen op een vaste plek op de weg. Om de tijden uit de signaalgroepafwikkeling te linken aan de detectiezones zijn verschillende uitgangspunten gehanteerd om te bepalen hoe tijdselementen met de positionering van de detectie samenhangen. In het document wordt een (normale) remvertraging van $2,5 \text{ m/s}^2$ gehanteerd, een geeltijd van minimaal 3 seconden, een snelheid van 15 m/s (bij 80 km/h -wegen) voor het laatste voertuig in de wachtrij en een reactietijd van $0,75$ seconden.

Vervolgens wordt de dilemmazone bepaald, het gebied waar automobilisten zowel kunnen stoppen als doorrijden op het moment dat het verkeerslicht geel wordt. De achterkant van dit gebied wordt gedefinieerd door de geeltijd te vermenigvuldigen met de snelheid.

In het huidige IVER-document is een tabel opgenomen, waarin de relevante beslissafstanden zijn opgenomen die bepalend zijn voor de detectiezones.

3.2 Alternatief detectieveld: Groen op Maat (GOM)

In het 'Groen op Maat'-detectieveld (Misdom, 2007 en Misdom en Van der Burgt, 2009) wordt een detectieveld gebruikt, waarbij de lange lus is vervangen door twee lange lussen en de verweglus verder naar achteren is geplaatst. Hierdoor wordt een groter gebied afgedekt in vergelijking met het IVER-detectieveld (zie figuur 3.1). In figuur 3.1 is alleen het detectieveld bij 50 km/h weergegeven. De detectievelden van 70 en 80 km/h zijn weergegeven in figuur 3.3 (70 km/h) en figuur 3.4 (80 km/h).



Figuur 3.1: Vergelijking detectievelden IVER en GOM bij 50 km/h

De effecten hiervan zijn met name merkbaar op richtingen waar enkele voertuigen per groenfase worden afgewikkeld (Misdom, 2007). Bij wachtrijen met meer voertuigen is de afwikkeling eveneens gunstiger, doordat de geelbenutting hoger ligt.

Uitgangspunt in GOM is het gebruik van dynamische hiaattijden. Gedurende de groenfase worden de hiaattijden korter, doordat de snelheid van het verkeer toeneemt tijdens het afrijproces van de wachtrij. Daardoor neemt de benodigde rijtijd af. Op het moment dat de rijtijd tot de stopstreep min de benutte geeltijd korter is dan de hiaattijd, worden de lussen uitgeschakeld om inefficiëntie te voorkomen.

3.3 Onderzoeken rondom verkeerslichten

3.3.1 Afwikkeling eerste deel wachtrij (onderzoek Grontmij)

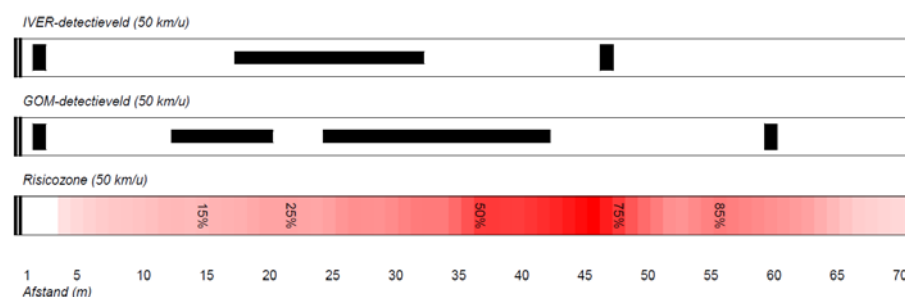
De huidige IVER-richtlijn wordt onderbouwd door een onderzoek van de Grontmij (2001). Uit het onderzoek blijkt dat de lengte van het eerste deel van de wachtrij gemiddeld 6 voertuigen bedraagt, maar dat er een grote spreiding rondom deze waarde zit (3-15 voertuigen). Het eerste deel van de wachtrij wordt gemeten tot het voertuig dat met de ontruimingssnelheid de stopstreep passeert. De snelheid waarmee de eerste 5 voertuigen de stopstreep passeren, loopt op van 15 km/h voor het eerste naar ongeveer 40 km/h voor het vijfde voertuig (vertrekkend vanuit stilstand).

3.3.2 Onderzoek geeltijden

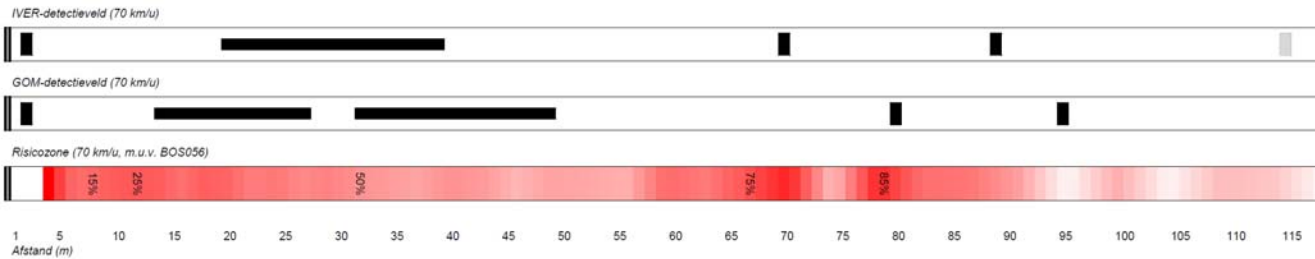
De geeltijd is in 2016 onderwerp van onderzoek geweest (Prinsen, Dicke-Ogenia, Krol, Zengerink en Hulleman, 2016). Uit dit onderzoek bleek dat de geeltijd, zoals deze in het huidige IVER-document voor rechtdoorgaand verkeer gehanteerd wordt, te kort is. Bij een langere geeltijd komt de achterkant van de dilemmazone dus ook verder van de stopstreep te liggen. Het keuzepunt, waarop weggebruikers beslissen om te stoppen of door te rijden, blijkt voor voertuigen op snelheid buiten het bestaande verlenggebied te vallen. Dit betekent dat het verlenggebied voor deze weggebruikers te kort is. In het IVER-detectieveld wordt de lus op 115 meter (bij 70 en 80 km/h) niet standaard toegepast en vaak ook niet gebruikt voor het aanvragen en verlengen.

In de figuur 3.2, 3.3 en 3.4 zijn achtereenvolgens voor 50, 70 en 80 km/h de risicozones weergegeven en vergeleken met het huidige IVER-detectieveld en het 'Groen op Maat'-detectieveld (GOM). De risicozone is het gebied waarin weggebruikers de keuze maken om te stoppen.

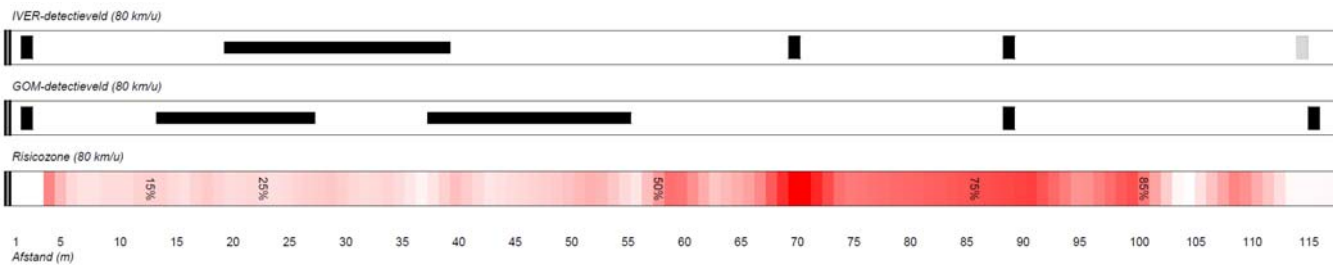
Met name bij 50 en 80 km/h blijkt dat ongeveer 25% van de weggebruikers zich in het gedeelte van de risicozone bevinden dat stroomopwaarts van het huidige IVER-detectieveld ligt.



Figuur 3.2: Vergelijking detectievelden en risicozone (50 km/h, rechtdoorgaand)



Figuur 3.3: Vergelijking detectievelden en risicozone (70 km/h, rechtdoorgaand)



Figuur 3.4: Vergelijking detectievelden en risicozone (80 km/h, rechtdoorgaand)

Uit het onderzoek blijkt ook een grote spreiding in de snelheden. Een deel van de spreiding in de snelheden moet opgevangen kunnen worden door het detectieveld. Voor de nieuwe geeltijden is uiteindelijk een rekenmethode opgesteld die uitgaat van een reactietijd van 1 seconde. Dit wijkt af van de waarde die nu in de detectiestandaard wordt gehanteerd (0,75 seconde). De afremvertraging bedraagt in het geeltijdenonderzoek $2,8 \text{ m/s}^2$ en ligt iets hoger dan de waarde in het huidige IVER-document ($2,5 \text{ m/s}^2$). In het geeltijdenonderzoek is geconstateerd dat het 85-percentiel van de snelheid tussen de verweglus en de koplus op afslaanse richtingen 35-48 km/h bedraagt. Het 85-percentiel voor de rechtdoorgaande richtingen wijkt ongeveer 5-10% naar boven of beneden af van de toegestane maximumsnelheid. De afwijking wordt beïnvloed door locatie-specifieke omstandigheden, zoals de aanwezigheid van langzaam verkeer, de weginrichting, de verkeersafwikkeling stroomafwaarts van het kruispunt en de aanwezigheid van roodlichtcamera's.

3.3.3 Onderzoek ontruimingstijden

In het huidige IVER-document wordt de voorkant van de dilemmazone berekend op basis van een hoge afremvertraging ($3,86 \text{ m/s}^2$). Uit het onderzoek naar de ontruimingstijden (Oppedijk, Krol, Geerligts en Prinsen, 2012) blijkt dat deze waarde in de praktijk lager ligt. Een meer reële waarde, die ook bij de nieuwe bepaling van de geeltijden is gehanteerd, bedraagt 2,5 tot 3 m/s^2 . In de richtlijn voor de ontruimingstijden is uiteindelijk gekozen om te rekenen met $2,5 \text{ m/s}^2$.

Een belangrijk aspect waar in de huidige standaard geen, of nauwelijks, rekening mee wordt gehouden, is de verandering van de snelheid gedurende de groenfase. In het onderdeel mechanica gaan we dieper in op de effecten van verkeersdynamiek.

Het onderzoek heeft geresulteerd in een nieuwe richtlijn voor het bepalen van de ontruimingstijden (CROW, 2013).

3.3.4 Onderzoek wachtstand

In het onderzoek naar de wachtstand (Prinsen, L. en Krol, L., 2012) is aandacht besteed aan de wachtstand bij verkeerslichten (rood of groen). Er zijn invloedsfactoren gedefinieerd en er is een intensiteitscriterium ontwikkeld om wegbeheerders te helpen bij de keuze voor de wachtstand. Het detectieveld is geen aandachtspunt in het onderzoek geweest. Toch zijn er twee aanbevelingen met betrekking tot detectie opgenomen:

- Overweeg het gebruik van aanvullende detectie op 200 à 300 meter om het beëindigen van de wachtstand te beïnvloeden.
- Geef weggebruikers tijdig duidelijkheid over het groen worden en blijven van het verkeerslicht. De dilemmazone geldt ook voor het aanvragen van groen bij wachtstand rood.

3.4 CROW-richtlijnen

Naast het al genoemde onderzoek met de betrekking tot de ontruimingstijden (Oppedijk, et al, 2012; CROW, 2013) zijn er twee relevante CROW-richtlijnen: het Handboek verkeersregelingen en het Handboek aanleg verkeersregelininstallaties.

3.4.1 CROW Handboek verkeersregelingen 2014

Het Handboek verkeersregelingen 2014 (CROW, 2014) bevat diverse hoofdstukken en paragrafen met detectie als onderwerp. Hierna zijn de belangrijkste punten benoemd.

Detectiefuncties

De functies die in het handboek worden onderscheiden, zijn aanvragen, tellen en hiaatmeting. De aanvraagfunctie is bedoeld om groen aan te vragen bij een verkeerslicht. Bij de stopstreep moet een voertuig in staat zijn om een aanvraag te doen, maar ook detectie verder weg van de stopstreep kan gebruikt worden voor het aanvragen van groen. Detectie kan ook gebruikt worden voor het tellen van verkeer. Voor het tellen is het van belang dat korte lussen worden toegepast, om te voorkomen dat voertuigen gemist worden. De laatste functie betreft de hiaatmeting, die bedoeld is om de groenfase langer vast te houden om het verkeer de gelegenheid te geven op gang te komen en richting de stopstreep te brengen. Het verlengen wordt beëindigd als een ingestelde tijd wordt overschreden.

Detectieconfiguratie ten behoeve van hiaatmeting

In het handboek wordt voor de instelling van de hiaattijden onderscheid gemaakt in drie doelen:

- Groenverlenging tot einde wachtrij.
De fase eindigt als een hiaat groter dan de ingestelde waarde wordt gemeten.
- Groenverlenging voor aankomende voertuigen.
Voor aankomende voertuigen, bijvoorbeeld een peloton van een ander kruispunt, wordt gebruik gemaakt van een tweede hiaattijd.

- Groenverlenging voor veilige beëindiging.
Door middel van hiaatmeting kan bijgehouden worden hoeveel auto's zich in de dilemmazone bevinden. Deze informatie kan gebruikt worden voor een veilige beëindiging van de groenfase.

Signaalgroepafhandeling

De signaalgroepafhandeling bestaat uit een aantal stappen, die achtereenvolgens doorlopen worden. De eerste groenfasen worden gebruikt voor de afwikkeling van de wachtrij, de overige groenfasen voor de afwikkeling van verkeer op snelheid. Dit stelt andere eisen aan het detectieveld. Er zijn veel verschillende manieren om in de software om te gaan met de verschillende groenfasen. Met name de instelling van de groentijden (VAG1, maximum etc.) en hiaattijden, al dan niet dynamisch, hebben een sterke invloed op de efficiëntie en comfort van de regeling. Andere aspecten die van belang zijn, zijn het verlengen op de koplus en het gebruik van de aanvraag- en verlengfunctie op de comfortlus, afhankelijk van de snelheid.

Verlengen fietsers

De detectie bij de stopstreep wordt gebruikt voor het aanvragen van een groenfase. Om te kunnen verlengen, is het voor (brom)fietsers wenselijk om detectie op afstand toe te passen. Door de lus op afstand te leggen, wordt voorkomen dat onbenut groen wordt weggegeven.

3.4.2 CROW Handboek aanleg verkeersregelininstallaties

In het handboek aanleg verkeersregelininstallaties (CROW, 2009) zijn diverse paragrafen over detectie opgenomen. Dit betreft met name technische aspecten, zoals voor- en nadelen van korte of lange lussen en redenen voor het onder een hoek aanbrengen van korte lussen.

3.5 Buitenlandse literatuur

Duitse literatuur

De Duitse Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2010) schrijft in de richtlijn voor verkeerslichten (RiLSA) niets over de vormgeving van het detectieveld.

Vlaamse literatuur

Het Vademecum Veilige wegen en kruispunten (Agentschap Wegen en Verkeer, 2009) beschrijft zeer globaal over het detectieveld. In het Vademecum zijn alleen richtlijnen gegeven voor het detectieveld, zoals beperkingen aan het gebruik van radar en het gebruik van meerdere radars op expreswegen.

Detectielussen worden toegepast om hiaten te meten ('1 of 1,5 meter'-lussen op 30 à 40 meter van de stopstreep). Voor aanvragen worden lussen van 9 tot 12 meter gebruikt. Op zijrichtingen wordt hiervoor een 2-meterlus toegepast en op linksafrichtingen en een 9-meterlus op circa 5 meter van de stopstreep. Voor het verlengen bij drukke richtingen wordt geadviseerd om de detectie toe te passen tot maximaal 40, 70 of 90 meter van de stopstreep, afhankelijk van de geeltijd (3, 4 of 5 seconden). Voor fietsers worden schuine lussen geadviseerd.

Britse literatuur

In het Verenigd Koninkrijk (Highways Agency, 2002; Highways Agency 2005) wordt een aanvraaglus toegepast op 3,5 seconden rijtijd voor de stopstreep. In de praktijk betekent dit dat deze lus in stedelijk gebied op 45 meter ligt. Buitenstedelijk ligt de lus op 55 of 65 meter van de stopstreep. Daarnaast kunnen detectielussen op 7,5-10 seconden van de stopstreep worden toegepast en lussen direct na een splitsing van de links- of rechtsaffer en lussen ter hoogte van de stopstreep. Naast de aanwezigheidsdetectie worden snelheidslussen (met verschillende haattijden) tot 80-160 meter toegepast, afhankelijk van de toegestane maximumsnelheid. Op basis van de snelheidsmeting wordt het groen een tijd vastgehouden.

3.6 Conclusies literatuurstudie

Vanuit het literatuuronderzoek is een aantal aspecten naar voren gekomen dat van belang is voor de bepaling van het detectieveld:

- **Functie van het detectieveld.**
Het detectieveld heeft een functie voor het aanvragen en verlengen van het groen en voor het tellen van voertuigen (monitoring). Voor het aanvragen geldt dat dit zowel dichtbij als op afstand kan, waarbij het zeker voor hoofdrichtingen wenselijk is om rekening te houden met de mogelijkheid om al vroeg groen aan te vragen. Eventueel kan dit een vooraanvraag zijn, indien er sprake is van een stroomafwaarts gelegen splitsing van opstelstroken.
- **Onderscheid stilstaande voertuigen en voertuigen op snelheid.**
Uit onderzoek blijkt dat het een tijd duurt voordat een wachtrij op snelheid is. Het detectieveld moet goed met deze situatie kunnen omgaan. Daarnaast geldt echter dat tijdens de groenfase verkeer op snelheid kan aankomen, waarvoor het van belang is om tijdig duidelijkheid te verschaffen of het licht groen blijft. Dit punt is afhankelijk van de snelheid.
- **Rekenparameters.**
Het huidige detectieveld is gebaseerd op parameters die afwijken van de waarden die uit andere onderzoeken blijken. De belangrijkste parameters zijn, naast de snelheid, de reactietijd en de afremvertraging. De gevonden waarden liggen tussen 0,75 en 1 seconde voor de reactietijd en 2,5 en 2,8 m/s² voor de afremvertraging. Dit leidt ertoe dat er, alleen al door van andere parameterwaarden uit te gaan, een ander detectieveld ontstaat.

De informatie die uit buitenlandse literatuur gevonden is, is beperkt. Vanuit de Vlaamse literatuur blijkt dat de toegepaste detectievelden veel korter zijn dan het huidige IVER-detectieveld. In het Verenigd Koninkrijk wordt gebruik gemaakt van snelheidsdetectie op afstanden van 80-160 meter van de stopstreep, afhankelijk van de toegestane maximumsnelheid. Op basis van de snelheidsmeting wordt het groen een tijd vastgehouden.

4

Theoretisch kader - mechanica

Vanuit een theoretische benadering zijn voertuigtrajectoriën gedefinieerd, waarmee invulling is gegeven aan het detectieveld. De theoretische situatie is beschouwd voor voertuigen die vanuit een wachtrij afrijden en voor voertuigen die op snelheid komen aanrijden. Vanuit deze beschouwing is een invulling gemaakt voor het detectieveld en de bijbehorende instelling voor de hiaattijden. Voor de mechanicaberekeningen is uitgegaan van een reactietijd van 1 seconde en een afremvertraging van $2,8 \text{ m/s}^2$. Dit sluit aan bij de gekozen parameters die in het onderzoek naar de geeltijden (Prinsen, et al, 2016) gehanteerd zijn.

4.1 Afwikkeling eerste voertuigen in de wachtrij

Benodigde groentijd

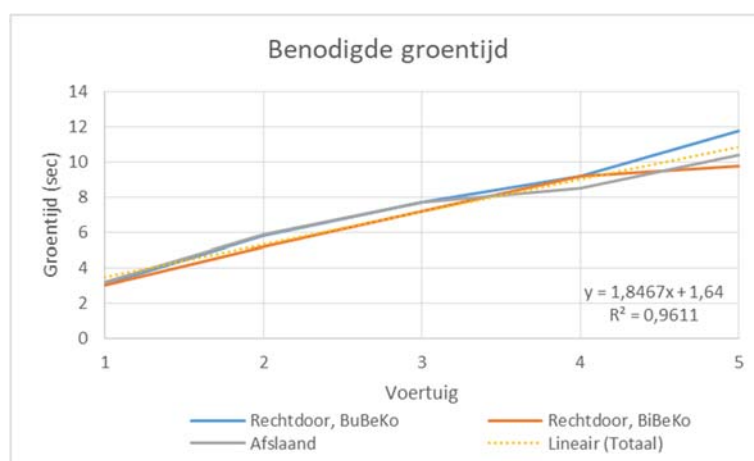
Uit het onderzoek van Grontmij (2001) blijkt dat voor de afwikkeling van de eerste 5 voertuigen ongeveer 10 à 11 seconden groen nodig is. Voor de afwikkeling van het eerste deel is er weinig verschil tussen rechtdoorgaand en afslaand verkeer. In tabel 4.1 zijn de in het onderzoek gemeten gemiddelde groentijden weergegeven (sommatie van de starttijd en de rijtijd uit de tabellen 17-19 uit het Grontmij-onderzoek). De spreiding rondom deze waarden is in het onderzoek niet weergegeven.

groentijd	voertuig 1	voertuig 2	voertuig 3	voertuig 4	voertuig 5
rechtdoor, bubeko	3,1	5,8	7,7	9,2	11,8
rechtdoor, bibeko	3,0	5,2	7,2	9,2	9,8
afslaand	3,2	5,9	7,7	8,5	10,4

Tabel 4.1: Gemiddelde benodigde groentijd voor de afwikkeling van de eerste 5 voertuigen (Grontmij, 2001)

De groentijd is afhankelijk van de duur van startgroen totdat een voertuig in beweging komt. Deze tijd kan veel langer of juist korter zijn dan een gemiddelde reactietijd, door afleiding tijdens het wachten of door wachttijdinformatie voor weggebruikers (Wachttijdvoorspelling, afteller). De signaalgroepafhandeling moet hierin, binnen grenzen, kunnen voorzien door bijvoorbeeld een vrijkomfunctie op de koplus toe te passen.

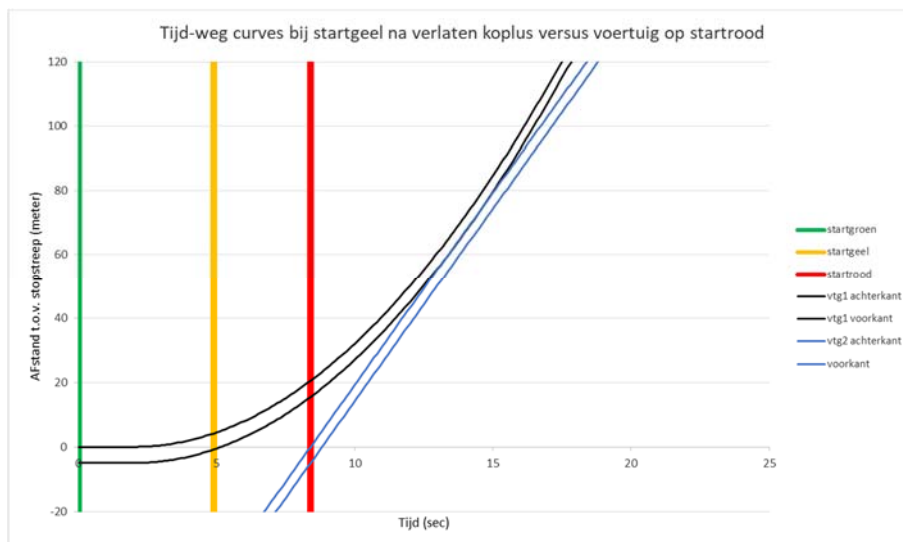
Lineaire regressie (zie figuur 4.1) op deze lijn laat zien dat de groentijd voor n voertuigen te schatten valt door 1,85 seconden per voertuig keer het aantal voertuigen, vermeerderd met 1,64 seconden.



Figuur 4.1: Benodigd groen voor de afwikkeling van de eerste 5 voertuigen, inclusief regressielijn over het totaal (Grontmij, 2001)

Voor de afwikkeling van het eerste deel van de wachtrij hoeft daarmee in de vormgeving van het detectieveld geen onderscheid te worden gemaakt naar snelheid en afslagbeweging. Uitgaande van een vastgroentijd van 6 seconden en een benutte geeltijd van 1 seconde worden gemiddeld genomen de eerste 3 voertuigen afgewikkeld, zonder enige vorm van verlengfunctie op de detectie. Wanneer gebruik gemaakt wordt van een vrijkomfunctie (of verlengfunctie met een hiaattijd van 0 seconde) op de koplus kan met een kortere vastgroentijd (3 seconden) ook het tweede voertuig afgewikkeld worden zonder dat er aanvullende detectie nodig is. Daarmee is vanaf het derde voertuig meer detectie nodig.

Het toepassen van een korte vastgroentijd in combinatie met het vasthouden van het groen totdat de koplus vrijkomt, zorgt ervoor dat het oprijdende voertuig alleen bij een lage optrekversnelling (1 m/s^2) maatgevend kan worden voor het bepalen van de afrijtijd, zoals bedoeld in de Richtlijn ontruimingstijden (CROW, 2013). In figuur 4.2 is een optrekcurve van een traag optrekkend voertuig (1 m/s^2 , gelijk aan de Richtlijn ontruimingstijden) weergegeven, waarbij het licht op geel gaat na het afvallen van de koplus (op 1 meter van de stopstreep). Een voertuig dat conform de Richtlijn ontruimingstijden afrijdt en op startrood met de neus op de stopstreep staat, haalt het traag optrekkende voertuig niet in.

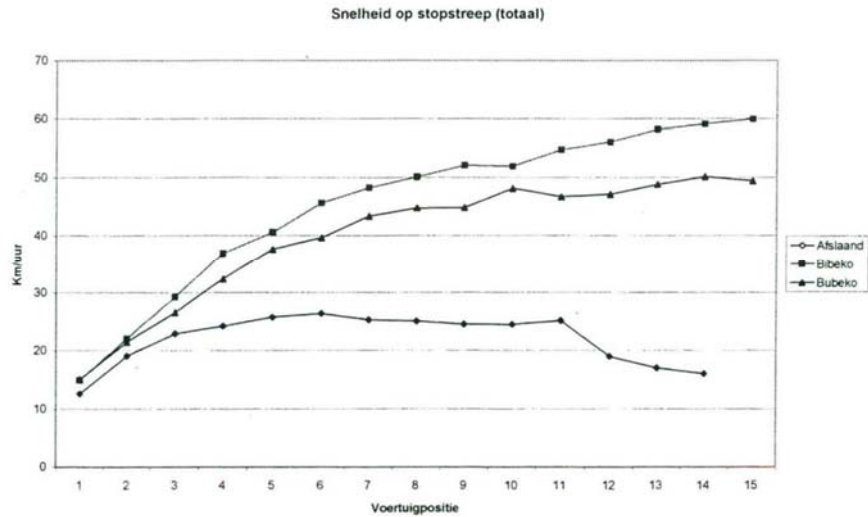


Figuur 4.2: Tijd-wegcurves bij startgeel na verlaten koplus versus voertuig op startrood

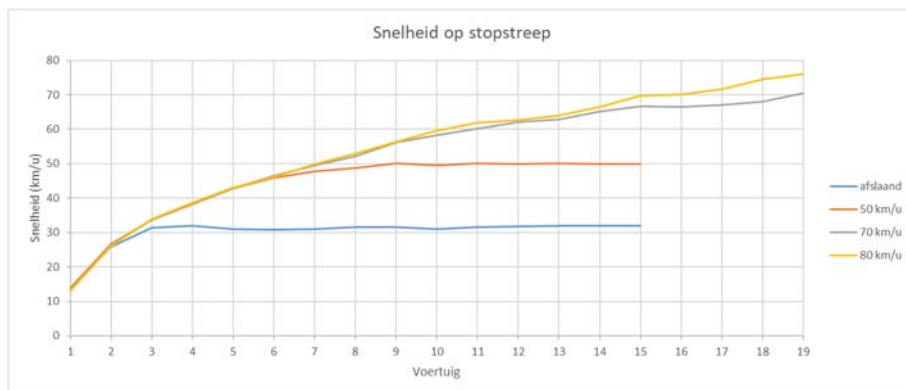
Snelheid op stopstreep

De snelheid op de stopstreep neemt gedurende de groenfase toe, totdat voertuigen hun gewenste maximumsnelheid bereiken. Uit het onderzoek van Grontmij (2001) blijkt dat de snelheid voor de eerste voertuigen vergelijkbaar is, ongeacht de maximumsnelheid (zie figuur 4.3). De metingen binnen de bebouwde kom kennen een hogere snelheid dan de metingen buiten de bebouwde kom. Het verschil bedraagt bij 15 voertuigen ongeveer 10 km/h (60 km/h binnen de bebouwde kom en 50 km/h buiten de bebouwde kom). Het onderzoek noemt als mogelijke verklaring voor het snelheidsverschil dat de intensiteit op het kruispunt binnen de kom lager ligt en dat het kruispunt zichtbaar vlak bij de komgrens ligt.

Ook een snelheidsanalyse in vissim laat zien dat de snelheid op de stopstreep langzaam toeneemt (zie figuur 4.4). De waarden komen goed overeen met het onderzoek van Grontmij.



Figuur 4.3: Snelheid voertuigen op stopstreep (Grontmij, 2001)



Figuur 4.4: Snelheid voertuigen op stopstreep in VISSIM

Conclusie afwikkeling eerste deel wachtrij

De afwikkeling van een wachtrij is voor de eerste voertuigen vrijwel onafhankelijk van de maximumsnelheid. Dit heeft tot gevolg dat het benodigde detectieveld voor de afwikkeling van het eerste deel van een wachtrij niet verschillend is voor rechtdoorgaand of afslaand verkeer of voor verschillende ontwerpnelheden. Wanneer gedurende de groenfase de snelheid toeneemt, ontstaan verschillen. Voor de afwikkeling van het vervolg van de wachtrij is de positionering en de instelling van de haattijden per lus verschillend voor verschillende snelheden.

4.2 Afwikkeling voertuigen op snelheid

Voor de afwikkeling van voertuigen op snelheid zijn twee aspecten van belang: het moment van groensturing en het moment van geelsturing.

Groensturing

Voor het comfort van weggebruikers is het wenselijk zo vroeg mogelijk duidelijkheid te geven of een voertuig moet stoppen of kan doorrijden. De benodigde stopafstand bedraagt 112 meter bij 80 km/h, uitgaande van 1 seconde reactietijd en een afremvertraging van $2,8 \text{ m/s}^2$. In de geeltijd bij 80 km/h, 5 seconden, had het voertuig een vergelijkbare afstand kunnen afleggen (111 meter). Op dit punt kan een voertuig dus kiezen om door te rijden en de geeltijd maximaal te benutten of om comfortabel te stoppen (zie tabel 4.2).

snellheid	km/h	40	50	60	70	80
snellheid	m/s	11,1	13,9	16,7	19,4	22,2
afremvertraging	m/s^2	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
geeltijd	s	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
reactietijd	s	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
afstand bij stoppen	m	34	49	67	88	112
afstand bij doorrijden	m	33	49	67	88	111

Tabel 4.2: Berekening afstand ten behoeve van stoppen of doorrijden tijdens geel

Voor het bieden van duidelijkheid in de dilemmazone, in bijvoorbeeld een 'wachtstand-rood'-situatie, is het daarom wenselijk om detectie met aanvraagfunctie te realiseren op het uiterste punt van stoppen (111 meter bij 80 km/h). Dit sluit aan bij bevindingen uit het wachtstandonderzoek (Prinsen et al, 2012).

Geelsturing in relatie tot minimale stopafstand

Op het moment van geelsturing geldt dat voertuigen, als bestuurders een noodstop maken, een minimale afstand nodig hebben om tot stilstand te komen. Als een automobilist bijvoorbeeld 80 km/h rijdt, een reactietijd van 0,5 seconde heeft en fors afremt met $7,5 \text{ m/s}^2$ bedraagt de benodigde stopafstand 44 meter. Het is onwaarschijnlijk dat voertuigen dan nog besluiten te stoppen, zodat het vanaf dit punt veilig is om de signaalgroep naar geel te sturen voor het betreffende voertuig. Wanneer het voertuig doorrijdt, passeert deze de stopstreep als het 2 seconden geel is. Dit bedraagt 40% van de geeltijd (5 seconden bij 80 km/h). In tabel 4.3 zijn de berekende minimale stopafstanden weergegeven.

snellheid (km/h)	40	50	60	70	80
geeltijd (sec.)	3	3,5	4	4,5	5
minimale stopafstand (m)	14	20	27	35	44
benut geel (sec.)	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
fractie benut geel	41%	41%	40%	40%	40%

Tabel 4.3: Benutte geeltijd (reactietijd 0,5 seconde, afremvertraging $7,5 \text{ m/s}^2$)

Voor alle snelheden geldt dat de benodigde stoptijd groter is dan 1 seconde als op het berekende punt naar geel gestuurd wordt. Er geldt echter wel dat de stoptijd en de stopafstand korter worden als een voertuig langzamer rijdt dan de toegestane snelheid. Als op het berekende punt naar geel gestuurd wordt, is de benutte geelfractie circa 50% in het geval een voertuig 20% langzamer rijdt dan de maximumsnelheid.

Uit onderzoek blijkt dat er een correlatie is tussen de aanrijsnelheid, reactietijd en afremvertraging (Gates et. al, 2007; Chang et. al, 1985). Een toename in aanrijsnelheid leidt tot een kortere reactietijd (Gates et al., 2007). Daarnaast hebben bestuurders met een korte reactietijd de neiging om comfortabel af te remmen, terwijl bestuurders met een lange reactietijd de neiging hebben dit te compenseren met een hogere afremvertraging (McGee et. al, 2012).

Dit betekent dat een voertuig met een lagere snelheid, een grotere kans heeft op een hogere reactietijd en daarmee een deel van het verschil compenseert. Wanneer een bestuurder een korte reactietijd heeft, is de kans groter dat hij minder hard remt. Wanneer een automobilist 20% langzamer rijdt, maar een reactietijd heeft van 1 seconde, dan is de benodigde afremvertraging 6 tot 8 m/s^2 . Dit leidt ertoe dat een regulier voertuig waarschijnlijk niet in de problemen komt als gestuurd wordt op een benutte geelfractie van 40%.

In tabel 4.4 is het effect weergegeven wanneer de snelheid 20% lager ligt.

20% lagere snelheid (km/h)	32	40	48	56	64
geeltijd (sec.)	3	3,5	4	4,5	5
stopafstand (m)	10	14	19	24	30
benut geel (sec.)	1,6	1,8	2,0	2,2	2,5
fractie benut geel	52%	51%	50%	50%	50%
benodigde remvertraging bij 1 seconde reactietijd (m/s^2)	8,1	7,1	6,6	6,2	6,0

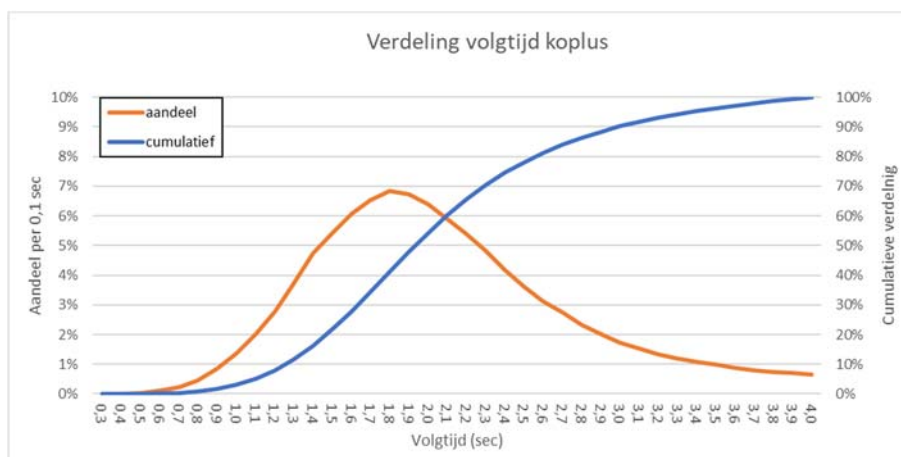
Tabel 4.4: Benutte geeltijd bij 20% lagere snelheid (reactietijd 0,5 seconde, afremvertraging 7,5 m/s^2)

Door de instelling van de hiaattijd te verhogen of te verlagen, heeft een wegbeheerder de mogelijkheid om hogere of lagere benutte geeltijden toe te passen.

Grenshiaten

Lange hiaattijden hebben als nadeel dat er lang doorverlengd kan worden. Wanneer alle voertuigen precies op 3 seconden achter elkaar aan rijden, daalt de afrijcapaciteit tot onder de 1.200 voertuigen per uur. Het is daarom wenselijk dat het verlenggebied niet te lang is. Uit metingen van Grontmij (2001) blijkt dat de volgtijd aan het begin van de wachtrij circa 2,5-3 seconden bedraagt.

Uit de dataverzameling van de Utrechtse kruispunten¹ is ook bepaald wat de volgtijd is op de koplus tijdens de groenfase. In figuur 4.5 is de verdeling weergegeven van de volgtijden (tijd tussen het afvallen van de koplus tot het opnieuw afvallen van de koplus). Uit de grafiek is af te leiden dat de mediaan op 2,0 seconden ligt; de modus ligt op 1,8 seconden. Ongeveer 90% van de hiaten is kleiner dan 3 seconden.



Figuur 4.5: Verdeling van de volgtijden op de koplus tijdens groen, op basis van dataverzameling Utrechtse kruispunten

Als de verkeersstroom op gang is, bedraagt de afrijcapaciteit 1.800-2.000 voertuigen per uur. De gemiddelde volgtijd is dan ongeveer 2 seconden. In de verkeersstroom komen, als gevolg van tragere voertuigen, uiteraard ook grotere hiaten voor, waarbij het niet wenselijk is om dan de groenfase te beëindigen. Uitgaande van een hiaattijd van 3 seconden, kan de lengte van het verlenggebied bepaald worden. De detectie moet het gebied beslaan tussen het punt van de minimale stopafstand, zoals berekend in de vorige paragraaf, en het punt dat 3 seconden stroomopwaarts ligt. In tabel 4.5 is te zien dat bij de snelheden tot en met 70 km/h het einde van het verlenggebied verder ligt dan het punt van aanvraag. Hiermee wordt het verlenggebied bepalend voor de positie van de detectielussen. Voor de aanvraagfunctie betekent dit dat er óf eerder aangevraagd wordt, óf dat (softwarematig) de aanvraag uitgesteld wordt óf dat er op een verder weggelegen lus pas wordt aangevraagd. Eerder aanvragen geeft eerder duidelijkheid aan de weggebruiker en heeft alleen een merkbaar effect in de rustige uren, waarmee het de voorkeur heeft om de verweglus op het einde van het verlenggebied te positioneren en ook voor het aanvragen te gebruiken.

¹ Hoofdstuk 5 betreft het onderzoek op basis van velddata naar de verandering als gevolg van het al dan niet aanvragen en verlengen op de verwegdetectie. Als 'bijvangst' van de dataverzameling is geanalyseerd wat de volgtijd op de koplus is op de Utrechtse kruispunten. Het betreft 80 km/h-kruispunten. De kruispunten zijn solitair geregelde kruispunten. De bepaling van de volgtijd is gebaseerd op passages tijdens de (volledige) groenfase, waarvoor geldt dat de gemeten hiaattijd niet groter is dan 4 seconden.

snellheid (km/h)	40	50	60	70	80
begin verlenggebied = minimale stopafstand (m)	14	20	27	35	44
einde verlenggebied (m)	47	61	77	93	111
aanvraagpunt (m)	34	49	67	88	112

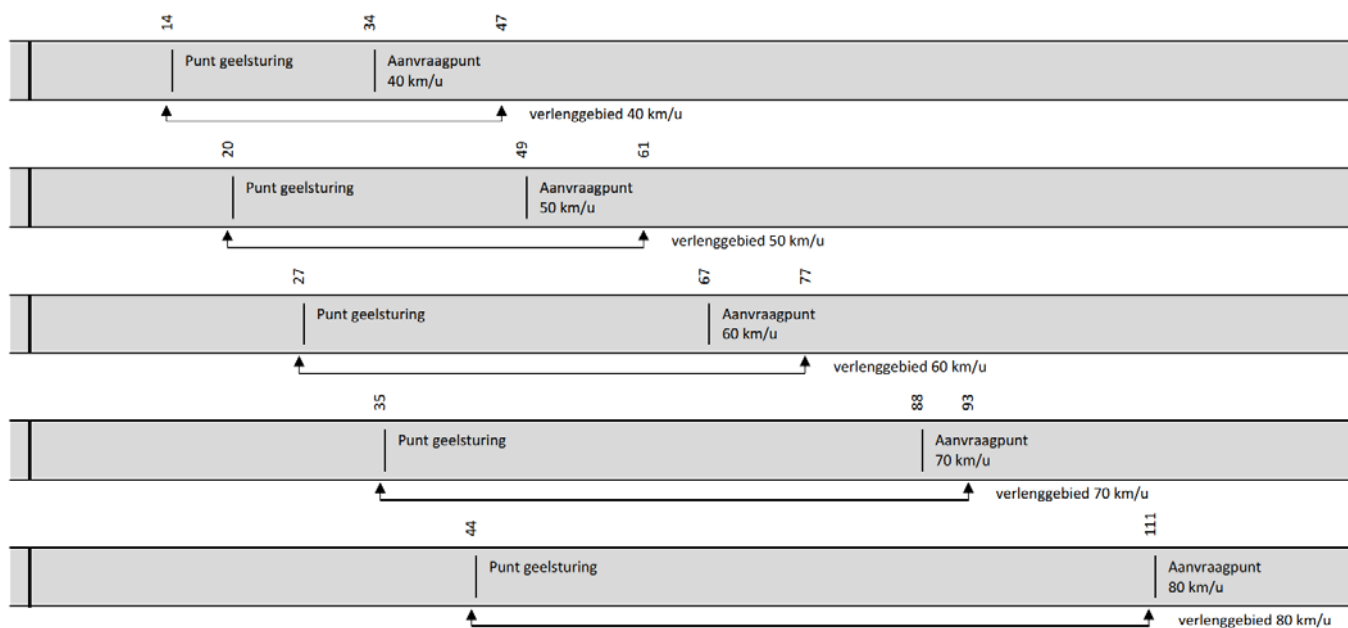
Tabel 4.5: Locatie verlenggebieden bij verschillende snelheden

Het nadeel van vroeg aanvragen is dat verkeer nog kan afslaan naar naastliggende rijstroken. Dit is met name bij korte opstelvakken een aandachtspunt. Hiervoor moeten in de regeling aanvullende maatregelen genomen worden om dit te ondervangen, zoals het intrekken van een aanvraag als deze niet bevestigd wordt op een van de benedenstroomse lussen.

Conclusie afwikkeling voertuigen op snelheid

Om voertuigen op snelheid tijdig duidelijkheid te geven over het al dan niet groen worden van de richting én om veilig en efficiënt het verkeer af te wikkelen, zijn drie detectiepunten bepaald: het punt waar de aanvraag wordt gezet, en het begin en einde van het verlenggebied. De gewenste geelsturing vindt plaats op het eindpunt van het verlenggebied. Het aanvraagpunt is afhankelijk van de benodigde stopafstand. Het punt van geelsturing hangt af van de snelheid en de benutte geeltijd. Voertuigen die langzamer dan de maximumsnelheid rijden, moeten door de gekozen geelsturing niet in de problemen gebracht worden. Voertuigen die sneller rijden dan de maximumsnelheid, komen niet in de problemen bij deze gekozen geelsturing.

In figuur 4.6 zijn de locaties van aanvragen, verlengen en geelsturing weergegeven.



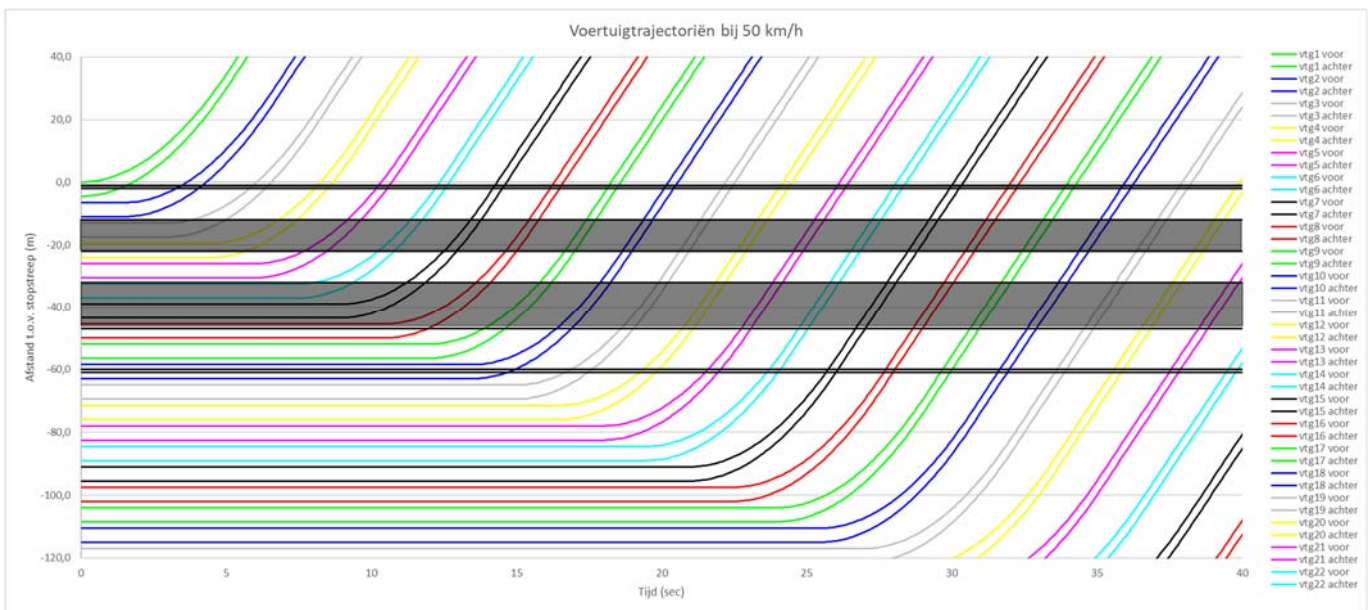
Figuur 4.6: Detectiepunten bij verschillende snelheden

4.3 Mechanicamodel

Om te bepalen waar de lussen moeten liggen, is een mechanicamodel opgesteld. Het model kent verschillende invoerparameters, zoals de snelheid, optrekversnelling, voertuiglengte, benutte geeltijd en positie van de detectie.

In het model zijn voertuigtrajectoriën beschreven, waardoor van een rij voertuigen op elk moment de positie bekend is. Uit dit model zijn vervolgens actuele hiaat-, volg- en rijtijden afgeleid.

In figuur 4.7 is een voorbeeld weergegeven van de voertuigtrajectoriën bij 50 km/h.



Figuur 4.7: Voorbeeld van het gehanteerde mechanicamodel, de donkere blokken zijn de posities van de detectoren bij 50 km/h

4.4 Invulling detectieveld

Op basis van de conclusies van de afhandeling van het eerste deel van de wachtrij en van voertuigen op snelheid kan het detectieveld ingetekend worden. De invulling van het detectieveld is in de hiernavolgende subparagrafen beschreven. Paragraaf 4.4.1 beschrijft het eerste gedeelte van het detectieveld, waarin de focus ligt op de afhandeling van het eerste deel van de wachtrij. In paragraaf 4.4.2 is de afwikkeling van het verkeer op snelheid beschreven in het gedeelte van het punt van geelsturing en het verlenggebied.

4.4.1 Invulling detectieveld ten behoeve van afhandeling eerste deel wachtrij

Koplus

De voorkant van het detectieveld wordt gevormd door de koplus op 1 tot 2 meter van de stopstreep. Deze lus heeft als functie om de eerste voertuigen te kunnen afwikkelen. Bij een vastgroentijd van 3 seconden in combinatie met een vrijkomfunctie en een koplusmaximum is, zoals beschreven in paragraaf 4.1, een aanvraagfunctie in principe voldoende om de eerste twee voertuigen te kunnen afwikkelen.

Bij een korte vastgroentijd is het noodzakelijk om niet te snel naar geel te sturen. De reden hiervoor is dat een optrekkend voertuig maatgevend kan worden voor het bepalen van de ontruimingstijd (CROW, 2013). Dit wordt voorkomen als een vrijkomfunctie of hiaattijd van 0 seconde wordt gebruikt. Bij het afvallen van de koplus is een voertuig zeker in beweging gekomen. Daarnaast is de voorkant van het voertuig al ruim de stopstreep gepasseerd. Bij een defect aan de koplus moeten hogere vastgroentijden toegepast worden, omdat anders een langzaam afrijdend voertuig maatgevend wordt voor het bepalen van de ontruimingstijd (CROW, 2013).

De keuze voor de vormgeving van de koplus (recht of onder een hoek) hangt van meerdere factoren af. In het Handboek aanleg verkeersregelinstanties (CROW, 2009) is hierover meer informatie te vinden.

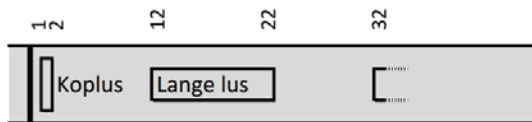
Detectie na de koplus

De eerste twee voertuigen nemen maximaal 12 meter in beslag, uitgaande van 6 meter per voertuig. De tweede lus, met een functie vanaf het derde voertuig, moet dus op 12 meter liggen en heeft als doel om het tweede deel van de wachtrij te kunnen afhandelen.

Wanneer een lange lus wordt toegepast moet deze, bij een benutte geeltijd van 1 seconde en een hiaattijd van 0 seconde, effectief zijn tot een voertuig met 10 m/s (36 km/h) de lus verlaat. De kop van het voertuig zit dan op 10 meter van de stopstreep. Uit de metingen van Grontmij (2001) en VISSIM blijkt dat dit het geval is bij het vijfde voertuig. De kop van het vijfde voertuig staat op startgroen ongeveer 20-25 meter. Wanneer een lange lus van 10 meter wordt toegepast, worden de eerste vijf voertuigen goed afgewikkeld. Hiervoor is ongeveer 10-12 seconden groen nodig; daarna moet de lus uitgeschakeld worden en wordt overgeschakeld naar verlengen op stroomopwaarts gelegen lussen.

Het zesde voertuig moet vervolgens de derde lus bezetten. Dat is het geval wanneer de lus op 32 meter begint. Dit punt is geschikt voor de geelsturing bij snelheden tot en met 60 km/h. Bij 70 en 80 km/h is het efficiënter om de lus uit te schakelen, tenzij een lage benutte geeltijd gewenst is. Door op dit punt eveneens een lange lus toe te passen, kan de hiaattijd kort blijven. Zo wordt geen onnodig groen weggeven. De lengte van de lus hangt af van twee factoren: de snelheid en de positie van de stroomopwaarts gelegen lussen met verlengfunctie. Wanneer de stroomopwaarts gelegen lus dichtbij ligt, is de rijtijd tot de derde lus kort. Hetzelfde geldt voor de snelheid: bij een hogere snelheid is de rijtijd tot de volgende lus korter. Vanaf dit punt is sprake van andere detectievelden bij verschillende snelheden.

In figuur 4.8 is de positionering van de eerste lussen weergegeven. Het detectieveld is toepasbaar voor alle snelheden.



Figuur 4.8: Invulling detectieveld ten behoeve van afhandeling eerste deel wachtrij

4.4.2 Invulling detectieveld verlenggebied

Na de afwikkeling van het eerste deel van de wachtrij volgt de volgende fase van groenverlenging. De lengte van het detectiegebied verschilt voor verschillende snelheden. Voor de invulling van het detectieveld is, op basis van een theoretisch tijdwegdiagram, bepaald hoe de hiaattijden zich ontwikkelen, hoe de rijtijd tot de stopstreep verandert en hoe de rijtijd tot de volgende verlenglus zich ontwikkelt. Er is onderscheid gemaakt voor snelheden van 40, 50, 60, 70 en 80 km/h. In de hiernavolgende paragrafen zijn de detectievelden beschreven. Aanvullende details over de rekenwijze zijn beschreven in bijlage 2.

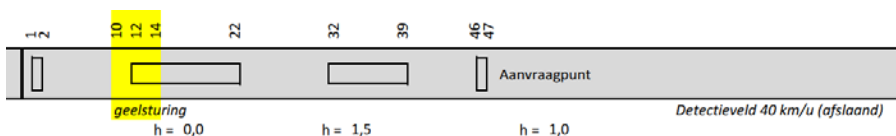
Detectieveld bij 40 km/h (afslaand verkeer)

Bij 40 km/h ligt het aanvraagpunt op 47 meter. Het gebied tussen 32 en 47 meter is klein, waardoor een lange lus van 15 meter zou volstaan. Het toepassen van een lange lus heeft als nadeel dat er geen mogelijkheid is om aan de stroomopwaartse kant van de rijstrook te tellen. Daarom is ervoor gekozen om twee lussen toe te passen: een lus van 32-39 meter en een korte lus op 47 meter.

Voor de geelsturing kan gebruik gemaakt worden van het afvallen van de eerste lange lus met een hiaattijd van 0 seconde. De kop van het voertuig is dan op ongeveer 7 meter van de stopstreep, waarmee de benutte geeltijd ongeveer 0,6 seconde bedraagt. Om het geel langer te benutten, moet de eerste lange lus na verloop van tijd afgeschakeld worden. Het verkeerslicht kan vervolgens naar geel gestuurd worden als een hiaat van 1,5 seconde op de tweede lange lus gemeten wordt en er geen verkeer meer stroomopwaarts is. De kop van het voertuig is dan op ongeveer 12 meter van de stopstreep.

De benodigde hiaattijden zijn voor de afslaande richtingen sterk afhankelijk van de situatie. De daadwerkelijke snelheid varieert doordat het verkeer op snelheid komt aanrijden en voor de bocht moet remmen. Het begin van de bocht ten opzichte van de stopstreep en de boogstraal bepalen hoe hard ter hoogte van de stopstreep gereden wordt.

In figuur 4.9 is het resulterende detectieveld weergegeven. Het geel gemarkeerde gedeelte toont het punt van geelsturing voor voertuigen die 80-100% van de maximumsnelheid rijden.

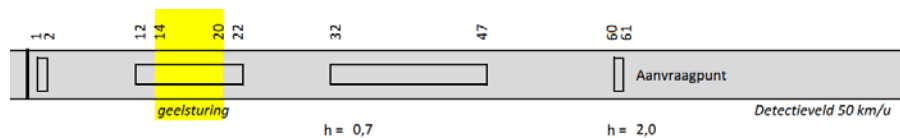


Figuur 4.9: Invulling detectieveld bij 40 km/h

Detectieveld bij 50 km/h

Bij 50 km/h ligt het aanvraagpunt op 61 meter. Door een lange lus toe te passen tussen 32 en 47 meter en een korte lus op 61 meter, ontstaat een detectieveld dat goed in staat is om het verkeer af te wikkelen. Het verkeerslicht moet naar geel gestuurd worden op basis van de tweede lange lus. Als er geen verkeer meer is en een hiaat van 0,7 seconden gemeten wordt, bevindt de kop van het laatste voertuig zich op ongeveer 17 meter van de stopstreep. De benutte geeltijd is dan ongeveer 1,2 seconde. Door de hiaattijd te wijzigen, is een hogere of lagere geelbenutting instelbaar.

In figuur 4.10 is het resulterende detectieveld weergegeven. Het geel gemarkeerde gedeelte toont het punt van geelsturing voor voertuigen die 80-100% van de maximumsnelheid rijden.

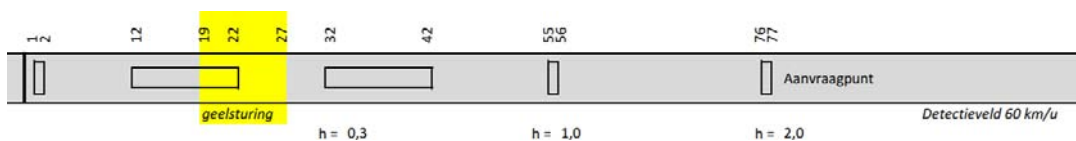


Figuur 4.10: Invulling detectieveld bij 50 km/h

Detectieveld bij 60 km/h

Het detectieveld bij 60 km/h loopt tot 77 meter. Vanaf het punt op 32 meter kan met een lange lus van 10 meter en twee korte lussen op 55 en 77 meter het verkeer goed afgewikkeld worden. Met een kleine hiaattijd op de tweede lange lus kan het verkeer veilig en efficiënt naar geel gestuurd worden. De hiaattijden op de korte verweglussen bieden voldoende ruimte om het verkeer tot op de volgende lus te brengen.

In figuur 4.11 is het resulterende detectieveld weergegeven. Het geelgemarkeerde gedeelte toont het punt van geelsturing voor voertuigen die 80-100% van de maximumsnelheid rijden.



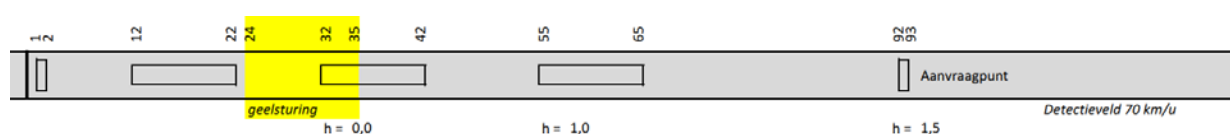
Figuur 4.11: Invulling detectieveld bij 60 km/h

Detectieveld bij 70 km/h

Bij 70 km/h zijn drie lussen van 10 meter, aangevuld met een verweglus en een koplus geschikt om het verkeer efficiënt en veilig af te wikkelen. De verweglus ligt op 93 meter en kan het verkeer met een (aflopende) hiaattijd tot op de lange lus op 55-65 meter brengen. Vervolgens kan telkens met een korte hiaattijd het verkeer een lus verder gebracht worden.

Geelsturing kan zowel gedaan worden op basis van de tweede als de derde lange lus. Bij hiaatsturing op de tweede lange lus is de benutte geeltijd voor een voertuig dat 70 km/h rijdt 1,4 seconden; een voertuig dat 20% onder de maximale snelheid rijdt heeft een benutte geeltijd van 1,7 seconden. Bij geelsturing op de derde lange lus met een hiaattijd van 1,0 seconde is de benutte geeltijd 1,6 seconde voor een voertuig dat 70 km/h rijdt.

In figuur 4.12 is het resulterende detectieveld weergegeven. Het geelgemarkeerde gedeelte toont het punt van geelsturing voor voertuigen die 80-100% van de maximumsnelheid rijden.

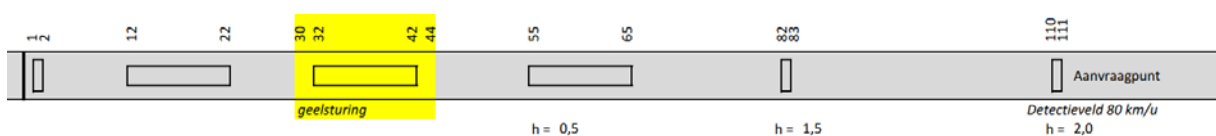


Figuur 4.12: Invulling detectieveld bij 70 km/h

Detectieveld bij 80 km/h

Bij 80 km/h ligt de meest ver weggelegen lus op 111 meter. Door, net als bij 70 km/h, drie lussen van 10 meter toe te passen en aanvullend nog een korte lus op 82 meter ontstaat een detectieveld dat het verkeer veilig en efficiënt kan afwikkelen. De geelsturing kan plaatsvinden op basis van de derde lange lus met een hiaattijd van 0,5 seconden. Het verkeer is dan op ongeveer 40 meter van de stopstreep en heeft dan nog een rijtijd van ongeveer 1,8 seconden.

In figuur 4.13 is het resulterende detectieveld weergegeven. Het geelgemarkeerde gedeelte toont het punt van geelsturing voor voertuigen die 80-100% van de maximumsnelheid rijden.

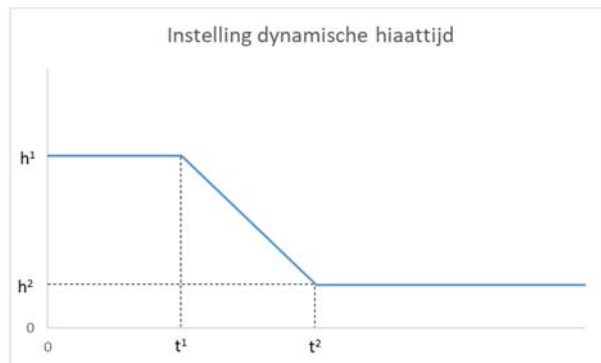


Figuur 4.13: Invulling detectieveld bij 80 km/h

4.5 Instellingen van de hiaattijden

Vanuit het oogpunt van een efficiënte verkeersafwikkeling en flexibele instelmogelijkheden is het wenselijk dat alle lussen de mogelijkheid hebben om aflopende hiaattijden te kunnen instellen, omdat in de loop van de groenfase de snelheid toeneemt en de rijtijd naar de stopstreep en de volgende lus afneemt. Hierdoor verschuift gedurende de groenfase ook het punt van geelsturing verder stroomopwaarts. Daarom moeten de lussen voor het punt van geelsturing een verlengfunctie hebben gedurende een instelbaar deel van de groenfase.

De koplus moet gedurende de eerste fase van het groen een vrijkomfunctie en een koplusmaximum hebben. Voor de verweglussen geldt dat deze gedurende de gehele groenfase het groen verlengen. Voor de verweglussen is de noodzaak van dynamische hiaattijden beperkt. In figuur 4.14 is schematisch weergegeven hoe de hiaattijden aflopen gedurende de groenfase.



Figuur 4.14: Schematische weergave aflopende hiaattijden

Bij de instelling van de tijden moet rekening worden gehouden met de vrijkomfunctie. Dat wil zeggen dat de tijdselementen afhankelijk zijn van het beginnen met rijden van het eerste voertuig. Als de koplus, de eerste lange lus en de tweede lange lus (alleen bij 70 en 80 km/h) op begin groen niet bezet zijn, dan moet direct voor alle lussen overgestapt worden op de lage hiaattijden en moeten de betreffende eerste lussen uitgeschakeld worden.

De gekozen instelling voor de tijdselementen zijn weergegeven in tabel 4.6.

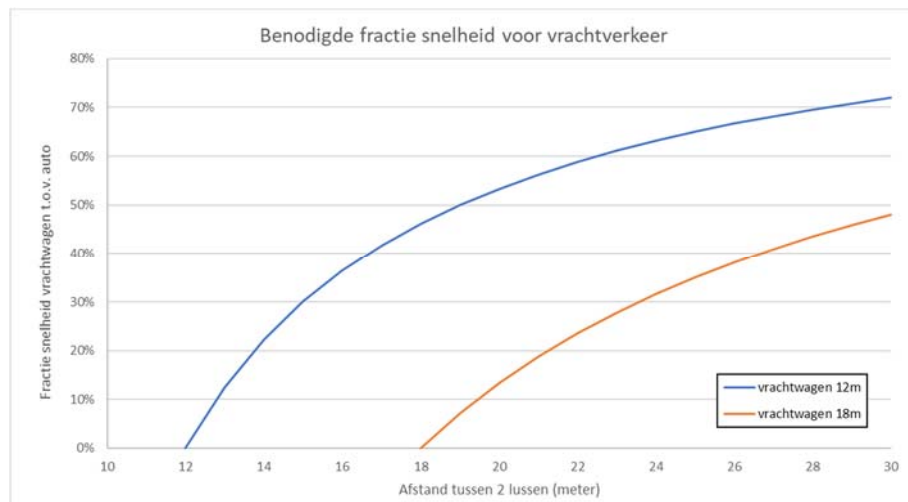
snelheid	detector	begin		eind		maximum		(sec.)
		(m)	(m)	t1 (sec.)	t2 (sec.)	h1 (sec.)	h2 (sec.)	
40 km/h	d1	1	2	-	-	0,0	0,0	8
	d2	12	22	-	-	0,1	0,1	-
	d3	32	39	-	-	1,5	1,5	-
	d4	46	47	-	-	1,0	1,0	-
50 km/h	d1	1	2	-	-	0,0	0,0	8
	d2	12	22	-	-	0,1	0,1	10
	d3	32	47	10	22	2,0	0,7	-
	d4	60	61	-	-	2,5	2,5	-
60 km/h	d1	1	2	-	-	0,0	0,0	8
	d2	12	22	-	-	0,1	0,1	10
	d3	32	42	10	20	2,0	0,3	-
	d4	55	56	-	-	1,5	1,5	-
	d5	76	77	-	-	2,5	2,5	-
70 km/h	d1	1	2	-	-	0,0	0,0	8
	d2	12	22	-	-	0,1	0,1	10
	d3	32	42	12	20	1,5	0,0	25
	d4	55	65	15	30	3,5	1,0	-
	d5	92	93	-	-	2,5	2,5	-
80 km/h	d1	1	2	-	-	0,0	0,0	8
	d2	12	22	-	-	0,1	0,1	10
	d3	32	42	12	20	1,0	0,0	20
	d4	55	65	15	30	1,5	0,5	-
	d5	82	83	20	40	3,0	1,0	-
	d6	110	111	-	-	2,0	2,0	-

Tabel 4.6: Instellingen tijdselementen van detectielussen

Wanneer verkeer op snelheid aankomt, zoals bijvoorbeeld bij een wachtstandsituatie, is het noodzakelijk dat de regeling direct overstapt op de hiaattijden die passen bij verkeer dat al op snelheid is. De regeling moet dus in staat zijn 'over te springen' van het wachtrijscenario naar het scenario met verkeer op snelheid. Dit is het geval als er op startgroen geen detectie is op de eerste twee lussen (bij snelheden tot 60 km/h) of drie lussen (bij 70 of 80 km/h).

4.6 Effect op vrachtverkeer

De invulling van het detectieveld biedt een goede mogelijkheid om het vrachtverkeer af te wikkelen. Bij alle snelheden geldt dat de ruimte tussen de lussen ongeveer 10 à 13 meter is, waardoor de meeste vrachtwagens altijd een van de lussen bezet houdt. Pas bij de korte verweglussen worden de tussenafstanden groter (17-27 meter). De ingestelde hiaattijden bieden voor het vrachtverkeer voldoende mogelijkheid om de volgende lus in het detectieveld te bereiken. De lengte van de vrachtwagen compenseert een eventuele lagere snelheid. In figuur 4.15 is de maximale snelheidsreductie weergegeven die een vrachtwagen mag hebben om in dezelfde tijd als een personenauto de volgende lus te bereiken. Voor een 18-meter vrachtwagen geldt bijvoorbeeld dat deze 40% van de snelheid van een auto (32 versus 80 km/h) moet rijden om in dezelfde hiaattijd een afstand van 27 meter tussen twee lussen te overbruggen. Een 12-meter vrachtwagen moet bijna 70% van de snelheid van een auto (55 versus 80 km/h) rijden. De langste afstand tussen twee lussen in het nieuw ontworpen detectieveld bedraagt 27 meter.



Figuur 4.15: Benodigde fractiesnelheid voor vrachtverkeer om binnen een gelijke tijd de volgende detectielus te bereiken

4.7 Fietsverkeer

Voor de afwikkeling van het fietsverkeer zijn dezelfde principes gehanteerd als voor het gemotoriseerde verkeer.

Uitgaande van een snelle fietser die 8 m/s (29 km/h) rijdt, ligt het aanvraagpunt op ongeveer 20 meter van de stopstreep. De minimale stopafstand van een fietser bedraagt 3 tot 8 meter, afhankelijk van de snelheid. Wanneer gerekend wordt met een grenshiaat van 3 seconden, ligt het einde van het verlenggebied tussen 15 en 32 meter van de stopstreep. Voor de fietsers is het verlenggebied daarmee maatgevend voor de keuze van de locatie van de verwegdetectie.

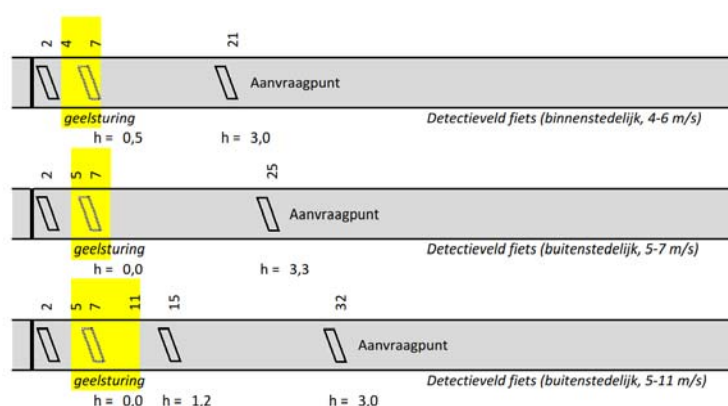
Om te voorkomen dat lang doorverlengd moet worden op de koplus, is het wenselijk om bij grote groepen fietsers een lus op 7 meter van de stopstreep toe te passen. De koplus kan dan gebruikt worden voor de afwikkeling van de eerste fietsers en vervolgens kan voor het verlengen van de groenfase de lus op 7 meter gebruikt worden.

Om te bepalen of er een hiaat in de fietsstroom is, moet een verweglus worden toegepast worden. De positie van deze lus is maximaal 3 seconden stroomopwaarts van de lus op 7 meter; hiermee kan gestuurd worden op het grenshiaat van 3 seconden. Langzame fietsers zijn maatgevend voor de positie van de lus. Uitgaande van een fietser die 4 m/s rijdt, een fietslengte van 1,5 meter en een luslengte van 0,5 meter komt deze lus dus op 21 meter van de stopstreep te liggen. In de hiaattijd van deze lus (3,0 seconden) is een fietser die meer dan 7 m/s rijdt, de stopstreep gepasseerd als het hiaat valt.

Met deze configuratie kan goed verlengd worden, maar ontstaat inefficiëntie wanneer er veel snelle fietsers zijn. Dit geldt met name buiten de stad, waar het aandeel snelle fietsers hoger is dan in de stad en bromfietsers op het fietspad moeten rijden. Op deze locaties is het wenselijk om de verweglus verder stroomopwaarts te plaatsen of een extra verweglus toe te passen en de eerste verweglus richting de stopstreep te schuiven.

Wanneer de verweglus op 25 meter wordt gelegd, kan beter omgegaan worden met snelle fietsers, maar is desondanks een hiaattijd van ruim 3 seconden nodig. Door de laatste lus op 32 meter te leggen, wordt fietsverkeer tot 8 m/s goed gefaciliteerd met een hiaattijd van 3 seconden. Wanneer een bromfietser, die maximaal 11 m/s rijdt, het laatste voertuig is, rijdt deze op het moment van geelsturing ter hoogte van de stopstreep. De geelbenutting is in dat geval nihil.

De invulling van het detectieveld voor (brom)fietsers is weergegeven in figuur 4.16. De richtinggevoeligheid van detectie is niet weergegeven in deze figuur.



Figuur 4.16: Invulling detectieveld (brom)fietsers

De keuze van het detectieveld hangt voornamelijk af van de mate waarin een wegbeheerder rekening wil houden met groepen fietsers, snelle fietsers en bromfietsers. Of de locatie hierbij binnen of buiten de bebouwde kom ligt, is hieraan ondergeschikt.

Het toepassen van de 7-meterlus is wenselijk bij grote groepen fietsers, zoals op een school- of snelfietsroute. Voor het verlengproces is deze lus geschikt. De 7-meterlus kan, met een hiaattijd van 0,5-1,0 seconde, eveneens gebruikt worden voor de geelsturing. Wanneer er tussen deze lus en de stopstreep nog een afslagmogelijkheid is, dan moeten aanvullende maatregelen genomen worden voor de aanvraagfunctie, zoals het intrekken van de aanvraag als deze niet wordt bevestigd op de koplus of het toepassen van een aanvraag na bezettijd.

De detectie van het fietsverkeer door middel van radar biedt de mogelijkheid een groter gebied te beschouwen. Als de radar zo wordt ingesteld dat het gebied tussen aanvragen en geelsturing in beeld is, worden fietsers continu 'gezien' en kan de groenfase hiermee verlengd worden. Als de detectiezone vrij is, kan de groenfase beëindigd worden. Radardetectie biedt tevens de mogelijkheid om de richting van de fietsers te bepalen, zodat de detectie richtinggevoelig is.

4.8 Kwalitatieve vergelijking detectievelden

Bij het ontwerpen van het detectieveld zijn meerdere varianten in ogenschouw genomen en met elkaar (kwalitatief) vergeleken. De gekozen vormgeving is in de voorgaande paragrafen beschreven. In de vergelijking van de mogelijke vormgevingen is gekeken naar de afwikkeling van de wachtrij en verkeer dat met de toegestane snelheid komt aanrijden. Hierbij is onderscheid gemaakt naar de mate waarin het detectieveld is geoptimaliseerd voor geelsturing, de grenshiaten, het bereiken van de volgende detectielus in het detectieveld en het punt waar de eerste aanvraagmogelijkheid ligt. In totaal zijn vijf detectievelden vergeleken en beschreven, waarvan de resultaten in tabel 4.7 zijn weergegeven.

Het betreft deze detectievelden:

- **Huidige IVER-detectieveld:** In het huidige detectieveld zijn de afstanden tussen de lussen in sommige gevallen te groot om de volgende lus te bereiken. Met name de situatie bij 50 km/h kent een lage hiaattijd op de verweglus (1 seconde). Als het verkeer nog niet op snelheid is, is dit onvoldoende om de lange lus te bereiken. Daarnaast is bij het opstellen van het detectieveld voornamelijk gekeken naar de wachtrijafhandeling en in mindere mate rekening gehouden met de aanvraagfunctie. Hierdoor ligt het eerste detectiepunt vaak te dicht bij de stopstreep. Doordat het detectieveld (relatief) weinig lussen heeft, zijn de kosten lager dan in de andere detectievelden.
- **Groen op Maat:** Het 'Groen op Maat'-detectieveld presteert aanzienlijk beter dan het huidige IVER-detectieveld. In het 80 km/h-detectieveld is de afstand tussen de lus op 88 meter en de lange lus op 56 meter iets groter dan in het voorgestelde detectieveld. Hierdoor kunnen langzame vrachtwagens zorgen voor een (onterechte) hiaatmeting. Hoewel in veel gevallen in het detectieveld bij 50 km/h een korte lus op 60 meter wordt toegepast, wordt in sommige gevallen pas op 42 meter een aanvraag gedaan. Dit is dicht bij de stopstreep dan wenselijk.

- **Detectieveld met uitsluitend korte lussen:** In de optimalisatie van het detectieveld is een variant met uitsluitend korte lussen beschouwd. Hoewel het detectieveld wat goedkoper is dan de andere velden, is de geelsturing een kritisch punt. Dit wordt veroorzaakt door het conflict tussen de benodigde hiaattijden voor het bereiken van de volgende lus. Deze zijn hoger dan bij lange lussen, wat tot gevolg heeft dat het lastiger is om efficiënt naar geel te sturen. Dit effect is groter bij lagere snelheden. Het detectieveld is niet verder uitgewerkt in dit onderzoek.
- **Detectieveld met twee lange lussen:** Een detectieveld dat op het GOM-detectieveld lijkt, is onderzocht. Hierbij zijn de lussen zo gepositioneerd dat het aanvraagpunt beter gefaciliteerd werd. Het bereiken van de volgende lus in de wachtrij situatie blijkt echter lastig. Het detectieveld is niet verder uitgewerkt in dit onderzoek.
- **Voorgestelde detectieveld met twee of drie 10-meterlussen:** In het definitieve detectieveld, zoals eerder gepresenteerd, wordt gebruik gemaakt van meerdere maar iets kortere lange lussen. Hiermee is een optimum gevonden tussen een detectieveld met alleen korte lussen (geschikt om een volgende lus te bereiken), en een detectieveld met lussen van 18 of 20 meter (geschikt voor efficiënte geelsturing). Doordat de kosten voornamelijk bepaald worden door het zagen van de lussen, is dit veld qua kosten vergelijkbaar met een GOM-detectieveld of een veld met twee lange lussen.

aspect	criterium	huidig IVER	Groen op Maat	korte lussen	twee lange lussen	voorgesteld detectieveld
wachtrij	geelsturing	!	✓	✗	✓	✓
	grenshiaat	✓	✓	✓	✓	✓
	bereiken volgende lus	✗	!	✓	!	✓
snelheid	geelsturing	✓	✓	!	✓	✓
	grenshiaat	✓	✓	✓	✓	✓
	bereiken volgende lus	!	✓	✓	✓	✓
kosten	aanvragen op afstand	✗	!	✓	✓	✓
	aanlegkosten	✓	!	✓	!	!

Tabel 4.7: Indicatieve vergelijking verschillende detectievelden

De doorstroming en de veiligheid zijn in het voorgestelde detectieveld beter geborgd dan in het huidige IVER-detectieveld. De meerkosten van de extra detectie (poorten, kabels, zaagwerk) worden door de baten gecompenseerd, doordat er minder voertuigverliesuren ontstaan.

4.9 Conclusie

Gemotoriseerd verkeer

De afwikkeling van een wachtrij is voor de eerste voertuigen vrijwel onafhankelijk van de maximumsnelheid. Dit heeft tot gevolg dat het benodigde detectieveld voor de afwikkeling van het eerste deel van een wachtrij niet verschillend is voor verschillende snelheidsregimes.

Om automobilisten tijdig duidelijkheid te geven over het al dan niet groen worden van de richting én om veilig en efficiënt het verkeer af te wikkelen, zijn drie detectiepunten bepaald: het punt van aanvragen, het verlenggebied en het punt waarop geelsturing plaatsvindt. Het ontworpen detectieveld is in staat om het verkeer vlot en veilig te kunnen afwikkelen.

In het detectieveld zijn de tussenruimtes, op een enkele uitzondering na, rond de 10 tot 13 meter. Hierdoor kan ook het vrachtverkeer goed afgewikkeld worden.

De verkeersregeling moet in staat zijn om aflopende hiaattijden te ondersteunen en om direct te kunnen overspringen naar het scenario, waarbij het verkeer op snelheid is. Door op alle lussen de mogelijkheid te creëren om dynamische hiaattijden gedurende een beperkte tijd toe te passen, kan op straat goed gestuurd worden.

Fietsverkeer

De snelheidsverschillen voor het fietsverkeer zijn dermate groot dat een compromis moet worden gezocht. Voor snelle fietsers is het wenselijk vroeg aan te vragen, maar dat leidt tot hoge benodigde hiaattijden voor de langzamere fiets. Daarom zijn voor de detectie van fietsverkeer drie detectievelden ontworpen die te karakteriseren zijn als binnenstedelijk (4-6 m/s), buitenstedelijk zonder bromfiets (5-7 m/s) en buitenstedelijk met bromfiets (5-11 m/s).

Binnenstedelijk, met snelheden tot 6 m/s, is detectie op de stopstreep en op 21 meter nodig.

Buiten de kom, waar de snelheden hoger liggen, moet eerder aangevraagd worden en is het verlenggebied groter. Wanneer rekening wordt gehouden met e-bikes (7 m/s), volstaat het om de verweglus naar 25 meter op te schuiven en de hiaattijd te verhogen. Wanneer ook de bromfiets (11 m/s) gefaciliteerd moet worden, is het toepassen van een extra verweglus noodzakelijk. De verweglussen komen dan op 15 en 32 meter te liggen. Bij grote aantallen fietsers, bijvoorbeeld op school- of snelfietsroutes, is het wenselijk om een extra lus op 7 meter toe te passen, zodat niet onnodig doorverlengd hoeft te worden op de koplus.

De detectie van het fietsverkeer door middel van radar biedt de mogelijkheid een groter gebied te beschouwen. Als de radar zo wordt ingesteld dat het gebied tussen aanvragen en geelsturing in beeld is, worden fietsers continu 'gezien' en kan de groenfase hiermee verlengd worden. Als de detectiezone vrij is, kan de groenfase beëindigd worden.

Het nieuwe detectieveld leidt tot een verbeterde doorstroming en hogere verkeersveiligheid. Dit rechtvaardigt de iets hogere aanlegkosten.

5

Veldonderzoek - data-analyse

In het praktijkonderzoek is gekeken naar het effect van het verruimen van het aanvraag- en verlenggebied. Hoe verandert hierdoor de verkeersafwikkeling (verliestijden) en de verkeersveiligheid (roodlichtnegatie, kans op kop-staartbotsingen)? Dit is gedaan door bij VRI's met een uitgebreid detectieveld te spelen met de aanvraag- en verlengfunctie van de lussen op 115 meter. Samen met de begeleidingsgroep zijn vier kruispunten gekozen met een geschikt detectieveld voor deze experimenten en zijn de perioden en situaties van de voor- en nameting bepaald. De resultaten uit de eerste twee elementen van het onderzoek 'literatuur' en 'mechanica' spelen een belangrijke rol bij de te onderzoeken situaties.

Het doel van het veldonderzoek is om te bepalen wat de effecten zijn van het verplaatsen van het punt vanaf waar wordt verlengd en de detectieaanvraag wordt gedaan. De verwachting is dat door het (naar achteren) verplaatsen van de dilemma- en comfortzone de verkeersveiligheid verbetert. Dit komt doordat de detectiezones beter aansluiten bij het te verwachten gedrag van het verkeer. Dit resulteert naar verwachting in een lagere roodlichtnegatie en een lager aantal potentieel onveilige situaties². Het effect op de verkeersafwikkeling kan zowel positief (betere aansluiting detectie bij gedrag) als negatief zijn (langer doorverlengen).

Uit het geeltijdenonderzoek (Prinsen et al, 2016) blijkt dat bij 80 km/h het 85-percentiel van de stopafstand op ongeveer 100 meter ligt, voorbij het punt waarop in de huidige IVER-standaard een lus wordt toegepast (89 meter). Door de lus op 114 meter eveneens te gebruiken ten behoeve van aanvragen en verlengen, is onderzocht wat de effecten zijn op roodlichtnegatie, de potentieel onveilige situaties en de verkeersafwikkeling.

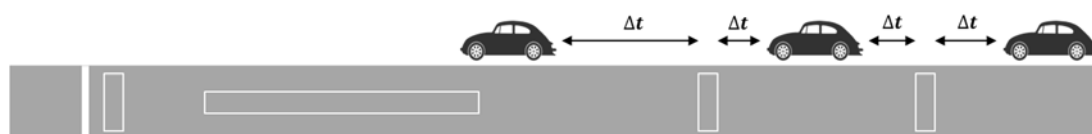
5.1 Onderzoeksopzet

Om te verifiëren of het verplaatsen van de detectiezones het beoogde effect heeft, is op vier locaties onderzoek gedaan. Op elk van deze locaties is zowel van de voor- als nasituatie twee weken data verzameld.

² Potentieel onveilige situaties worden gedefinieerd als voertuigen die zich in of nabij de dilemmazone bevinden op het moment dat het verkeerslicht geel wordt.

In de analyse is onderzocht of de roodlichtnegatie en het aantal potentieel onveilige situaties zijn afgenomen. Voor het vergelijken van roodlichtnegatie is gekeken naar het aantal passages tijdens rood.

Voor het aantal potentieel onveilige situaties is een histogram gemaakt van de duur tot de eerste passage op de eerste en tweede verweglus, gerekend vanaf het moment dat een richting geel wordt. Wanneer de tijd kort is, is sprake van een potentieel onveilige situatie. Indien deze tijd lang is (meer dan x seconden), is er geen sprake van een potentieel onveilige situatie. In figuur 5.1 is schematisch weergegeven welke tijden bepaald zijn op het moment dat de regeling naar geel gaat.



Figuur 5.1: Schematische weergave analyse potentieel onveilige situaties

Naast de analyse van de potentieel onveilige situaties en de roodlichtnegatie, analyseren we ook de verandering in verliestijd en stops. Hiervoor gebruiken we data uit de Kwaliteitscentrale (KWC).

5.2 Onderzoekslocaties

Op vier locaties is onderzoek gedaan naar de effecten van het punt waarop groen wordt aangevraagd en verlengd. Het betreft de volgende locaties:

- Kruispunten 's Hertogenbosch:
 - Randweg - Vlijmenseweg - Deutersestraat (70 km/h);
 - Gestelseweg - Brabantlaan - Pettelaarseweg (50 km/h).
- Kruispunten provincie Utrecht:
 - N224 - N227 (Woudenberg) (80 km/h);
 - N199 - Maatweg (Amersfoort) (80 km/h).

In bijlage 3 zijn kaarten opgenomen waarop de kruispunten zijn aangegeven.

Voor de kruispunten in 's-Hertogenbosch is de data van de voormeting afkomstig uit het onderzoek naar de geeltijden (Prinsen et al, 2014). De nameting is gedaan in december 2017.

5.3 Resultaten kruispunten 's-Hertogenbosch

Intensiteiten

Tussen de voor- en nameting blijkt dat de intensiteiten op beide kruispunten zijn toegenomen op de hoofdrichtingen. Op het kruispunt Randweg bedraagt de toename voor het doorgaande verkeer 3-5%. Op de Oude Vlijmenseweg is een afname zichtbaar van 7%. Op het kruispunt Gestelseweg is de toename voor het doorgaande verkeer 10-16%, terwijl op de Pettelaarseweg het verkeer met 5% afneemt.

Een belangrijke verklaring voor de grote verschillen is dat in de tussentijd op beide kruispunten de detectie en de regeling gewijzigd zijn. Hierbij zijn de verweglussen op de Vlijmenseweg en de Randweg verplaatst van 90 naar 95 meter en op de Oude Vlijmenseweg van 47 naar 60 meter. Op de Gestelseweg (zuid) zijn de verweglussen van 88 naar 60 meter verschoven. Op de overige takken zijn de verweglussen van 44 naar 60 meter verplaatst. Op het kruispunt Randweg is eveneens sprake van capaciteitsuitbreiding op een aantal richtingen.

Roodlichtnegatie

Op de Randweg staan roodlichtcamera's voor het doorgaande verkeer. Hierdoor is de roodlichtnegatie 0% in zowel de voor- als nameting. Op de overige richtingen is de roodlichtnegatie vergelijkbaar tussen de voor- en nasituatie (veranderingen van 1% naar boven of beneden).

Op het kruispunt Gestelseweg is het beeld van de roodlichtnegatie diffuus. Op de meeste richtingen verschilt de roodlichtnegatie tussen de voor- en nameting nauwelijks. Op de Pettelaarseweg neemt op de rechtdoor- en linksafstrook de roodlichtnegatie af van 20 naar 11%, maar op de rechtsafstrook neemt de roodlichtnegatie juist toe van 2 naar 9%. Zowel in de voor- als nameting is de roodlichtnegatie op deze tak hoog, wat mogelijk veroorzaakt wordt door overspraak op de koplussen.

Potentieel onveilige situaties

Door de grote intensiteitsverschillen en de tussentijdse wijziging van de detectie en de verkeersregeling is geen eenduidig beeld te schetsen van het aantal potentieel onveilige situaties. Op beide kruispunten is het detectieveld volgens de IVER-standaard vervangen door een 'Groen op Maat'-detectieveld. De verschillen in de detectie zijn dermate groot dat geen zinvolle conclusies te trekken zijn.

Verliestijd en stops

Door de grote intensiteitsverschillen en de wijziging van de vormgeving en detectie is de analyse naar de verliestijd en het aantal stops niet gedaan. Eventuele veranderingen worden door zo veel verschillende omstandigheden beïnvloed dat geen zinvolle conclusie te trekken is.

5.4 Resultaten kruispunten provincie Utrecht

Voor de kruispunten in Utrecht is in januari tot april in verschillende weken data verzameld. Op de kruispunten N224 - N227 (Woudenberg) en N199 - Maatweg (Amersfoort) zijn twee sets data verzameld; één set betreft de situatie waarbij op de detectielussen op 114 meter zowel aangevraagd als verlengd wordt. In de andere set stond zowel het aanvragen als verlengen uit.

Intensiteiten

De intensiteiten op het kruispunt N224 - N227 liggen in de situatie met aanvragen en verlengen gemiddeld 16% hoger. De toename is op vrijwel alle dagen en alle richtingen te zien. De oorzaak hiervan is niet bekend. Een mogelijke verklaring is dat het gedurende de meting zonder aanvragen en verlengen in het zuiden van het land vakantie was, waardoor er minder (sluip)verkeer via de N224 was.

Op het kruispunt N199 - Maatweg is het verschil tussen beide metingen minimaal. In de situatie met aanvragen en verlengen is de intensiteit gemiddeld 1% lager.

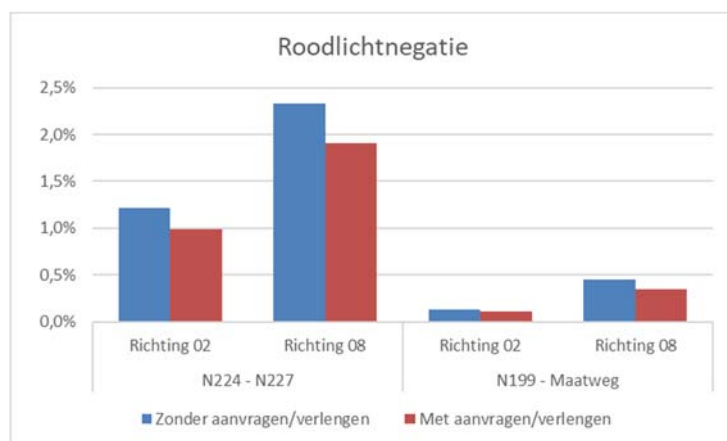
Roodlichtnegatie

Op beide kruispunten is de roodlichtnegatie op de hoofdrichting lager, wanneer wordt aangevraagd en verlengd op de detectielus op 114 meter. Op het kruispunt N224 - N227 daalt de roodlichtnegatie van 1,2 naar 1,0% op richting 02 en van 2,3 naar 1,9% op richting 08. In absolute zin neemt het aantal roodlichtrijders af, terwijl de intensiteit sterk toeneemt.

Op het kruispunt N199 - Maatweg is op richting 02 een minimale afname te zien (<0,1 procentpunt), op richting 08 is de afname 0,1 procentpunt (0,4 naar 0,3%). In tabel 5.2 en figuur 5.2 zijn de resultaten van de metingen weergegeven.

kruispunt	totaal	aantal	fractie
		roodrijders	roodrijders
N224 - N227: zonder aanvraag en verlengen	133.537	2.295	1,7%
□ richting 02	73.607	897	1,2%
□ richting 08	59.930	1.398	2,3%
N224 - N227: met aanvraag en verlengen	152.241	2.124	1,4%
□ richting 02	84.292	831	1,0%
□ richting 08	67.949	1.293	1,9%
N199 - Maatweg: zonder aanvraag en verlengen	333.754	975	0,3%
□ richting 02	164.227	213	0,1%
□ richting 08	169.527	762	0,4%
N199 - Maatweg: met aanvraag en verlengen	323.069	748	0,2%
□ richting 02	157.534	171	0,1%
□ richting 08	165.535	577	0,3%

Tabel 5.1: Aantal en aandeel roodlichtrijders



Figuur 5.2: Roodlichtnegatie doorgaande richtingen

Potentieel onveilige situaties

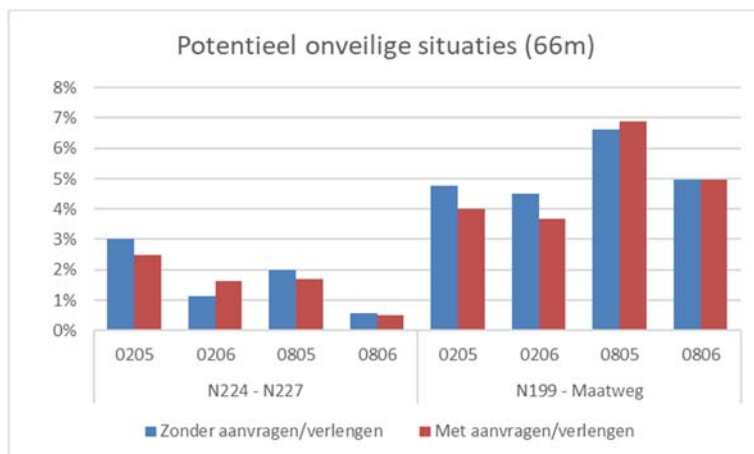
Met het aanvragen en verlengen op de detectie op 114 meter neemt ook het aantal onveilige situaties af. In de analyse is de tijd bepaald tussen het begin van de geelfase en de eerste detectiemelding op een lus en de tijd tussen het afvallen van een detectiemelding en het begin van geel. De verdeling van de tijden geeft inzicht in de positie waar een voertuig zich bevindt bij het begin van de geelfase.

Voor de analyse van de tijd tussen het geel worden van het verkeerslicht en het opkomen van de detectielus, is gekeken naar de lus op 66 meter en het aandeel van de situaties waarbij binnen 2 seconden de detectielus opkomt.

Uit de analyse blijkt dat op de meeste rijstroken (vijf van acht) sprake is van een afname van de kans dat een voertuig binnen 2 seconden de lus op 66 meter bereikt. Dit betekent dat zich minder vaak een voertuig in de dilemmazone bevindt op het moment dat het verkeerslicht naar geel gaat. In tabel 5.2 en figuur 5.3 zijn de resultaten weergegeven.

kruispunt	richting/ rijstrook	totaal	aantal	fractie
N224 - N227: zonder aanvraag en verlengen	02	23.008	565	2,46%
	0205 (66 m)	16.208	487	3,00%
	0206 (66 m)	6.800	78	1,15%
	08	23.262	364	1,56%
	0805 (66 m)	16.184	323	2,00%
	0806 (66 m)	7.078	41	0,58%
N224 - N227: met aanvraag en verlengen	02	23.479	518	2,21%
	0205 (66 m)	16.013	397	2,48%
	0206 (66 m)	7.466	121	1,62%
	08	23.806	312	1,31%
	0805 (66 m)	16.058	274	1,71%
	0806 (66 m)	7.748	38	0,49%
N199 - Maatweg: zonder aanvraag en verlengen	02	30.777	1.432	4,65%
	0205 (66 m)	17.272	825	4,78%
	0206 (66 m)	13.505	607	4,49%
	08	19.941	1.163	5,83%
	0805 (66 m)	10.472	694	6,63%
	0806 (66 m)	9.469	469	4,95%
N199 - Maatweg: met aanvraag en verlengen	02	30.677	1.183	3,86%
	0205 (66 m)	17.383	694	3,99%
	0206 (66 m)	13.294	489	3,68%
	08	17.340	1.035	5,97%
	0805 (66 m)	9.047	622	6,88%
	0806 (66 m)	8.293	413	4,98%

Tabel 5.2: Potentieel onveilige situaties, kans om binnen 2 seconden na start geel op 66 meter gedetecteerd te worden



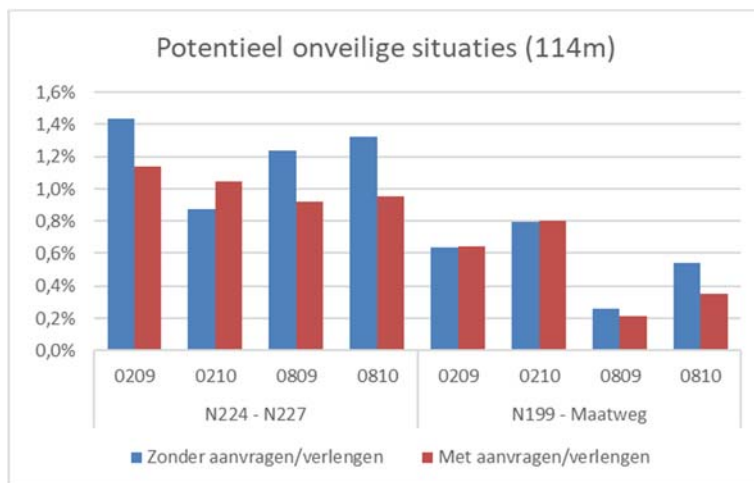
Figuur 5.2: Potentieel onveilige situatie (kans om binnen 2 seconden na start geel op 66 meter gedetecteerd te worden)

Omgekeerd neemt de kans af dat het verkeerslicht naar geel gaat, wanneer een voertuig hooguit 2 seconden geleden de detectie op 114 meter heeft verlaten. Op vijf van de acht rijstroken is sprake van een afname, tot maximaal 0,4 procentpunt.

In tabel 5.3 en figuur 5.3 zijn de resultaten van de metingen weergegeven.

kruispunt	richting/ rijstrook	totaal	aantal	fractie
N224 - N227: zonder aanvraag en verlengen	02	23.870	300	1,26%
	0209 (114 m)	16.218	233	1,44%
	0210 (114 m)	7.652	67	0,88%
	08	24.466	310	1,27%
	0809(114 m)	16.177	200	1,24%
	0810 (114 m)	8.289	110	1,33%
N224 - N227: met aanvraag en verlengen	02	24.450	271	1,11%
	0209 (114 m)	16.114	184	1,14%
	0210 (114 m)	8.336	87	1,04%
	08	24.601	229	0,93%
	0809 (114 m)	16.001	147	0,92%
	0810 (114 m)	8.600	82	0,95%
N199 - Maatweg: zonder aanvraag en verlengen	02	28.624	200	0,70%
	0209 (114 m)	17.331	110	0,63%
	0210 (114 m)	11.293	90	0,80%
	08	19.824	78	0,39%
	0809 (114 m)	10.468	27	0,26%
	0810 (114 m)	9.356	51	0,55%
N199 - Maatweg: met aanvraag en verlengen	02	28.147	198	0,70%
	0209 (114 m)	17.425	112	0,64%
	0210 (114 m)	10.722	86	0,80%
	08	17.267	48	0,28%
	0809 (114 m)	9.037	19	0,21%
	0810 (114 m)	8.230	29	0,35%

Tabel 5.3: Potentieel onveilige situaties, kans dat het verkeerslicht geel wordt binnen 2 seconden na detectie op 114 meter



Figuur 5.3: Potentieel onveilige situatie (kans dat het verkeerslicht geel wordt binnen 2 seconden na detectie op 114 meter)

Stops

In het aantal stops is op beide kruispunten geen duidelijke lijn te ontdekken. Dit heeft voor het kruispunt N224 - N227 enerzijds te maken met de intensiteitstoename, waardoor het aantal stops over het algemeen toeneemt. Op de hoofdrichting is in de ochtendspits echter de toename van het verkeer groter dan de toename van het aantal stops, terwijl dat in de overige perioden niet het geval is.

Op het kruispunt N199 - Maatweg zijn de intensiteiten tussen beide metingen beter vergelijkbaar, maar is geen patroon te ontdekken. Op het kruispunt als geheel neemt het aantal stops met 3% af, maar in de ochtendspits is echter een toename te zien van 4%. Er kunnen daardoor geen conclusies gelegd worden tussen de gekozen instellingen en het aantal stops.

5.5 Conclusie

Op de kruispunten in 's-Hertogenbosch kunnen de gevonden verschillen niet worden toegeschreven aan één specifieke wijziging. De verandering van de vormgeving van de kruispunten leidt tot verandering van verkeersstromen en de verandering van de regeling heeft eveneens effect op de afwikkeling van het verkeer. Het is voor deze kruispunten niet mogelijk om het effect van een ander detectieveld te beoordelen.

Uit de analyse voor de Utrechtse kruispunten, waar de toegestane snelheid 80 km/h is, blijkt dat de roodlichtnegatie en het aantal verkeersonveilige situaties afneemt, door de aanvraag- en verlengfunctie op 114 meter in te schakelen. Het inschakelen van de aanvraag- en verlengfunctie heeft geen duidelijk effect op de verkeersafwikkeling, hoewel er wel meer verkeer verwerkt wordt. Dit effect bevestigt dat het eerste detectiepunt bij 80 km/h rond deze afstand moet liggen.

6

Simulaties

Op basis van de resultaten van de eerste drie elementen ('literatuur', 'mechanica' en 'praktijkonderzoek') is inzicht verkregen in de optimale opzet van de detectieconfiguratie en signaalgroepafwikkeling. In de simulatieomgeving is deze opzet getest ten opzichte van de huidige detectiestandaard en signaalgroepafwikkeling.

Gekozen is voor simulatie, omdat het wijzigen van detectievelden en signaalgroepafwikkeling op straat geen optie is, gezien de hiermee gepaard gaande kosten en de doorlooptijd van het project. Een ander voordeel van simulatie is de vergelijkbaarheid van de resultaten van varianten. De simulaties leveren een degelijke onderbouwing van de nieuwe detectiestandaard en signaalgroepafwikkeling op. In dit hoofdstuk zijn de opzet en de resultaten van de met VISSIM uitgevoerde simulaties beschreven.

6.1 Vertaling mechanica naar simulaties

Gehanteerde software

Voor de validatie van het conceptuele model is een verkeersregeling in CCOI gegenereerd. Aan deze basisregeling is een aantal functies toegevoegd, zoals de mogelijkheid om om te gaan met dynamische hiaattijden en het kunnen overspringen naar de situatie met verkeer op snelheid. Het overspringen is in de CCOI-code opgenomen door te bepalen of er op startgroen hiaattijden lopen op de voorste twee of drie lussen. Als er geen hiaattijden op deze lussen lopen, worden deze lussen uitgezet of ingesteld op de lage hiaattijden, passend bij verkeer dat op de toegestane snelheid komt aanrijden.

De dynamische hiaattijden zijn ingesteld door per lus twee hiaattijden en twee tijden op te geven in de regeling. Tussen startgroen en het eerste tijdselement is de hiaattijd gelijk aan de eerst ingestelde hiaattijd. Tussen beide tijdselementen neemt de hiaattijd lineair af en na het tweede tijdselement heeft de lus de hiaattijd zoals ingesteld in de tweede hiaattijd (zie figuur 4.14).

Daarnaast kan elke lus na een instelbaar deel van de groenfase uitgeschakeld worden. De tijden starten bij het begin van de groenfase³. Vanaf dat moment wordt niet meer verlengd op de betreffende lus.

De col-regeling is opgenomen in VISSIM, een microsimulatiemodel. In het model zijn de parameters verder geoptimaliseerd en is beoordeeld hoe de afwikkeling van het verkeer is, in vergelijking met een standaarddetectieveld. Het netwerk bestaat uit één signaalgroep, waarbij twee scenario's zijn gesimuleerd: het wachtrijscenario en het doorrijscenario. In beide scenario's wordt op de eerste seconde een auto gegenereerd. Vervolgens wordt elke cyclus van 120 seconden één auto meer gegenereerd. Zo ontstaat een systeem waarbij er elke cyclus meer verkeer naar het verkeerslicht gestuurd wordt. Vervolgens is het model uitgebreid om meerdere modaliteiten en snelheden te onderzoeken, en te vergelijken met het huidige IVER-detectieveld. De gehanteerde tijdselementen zijn gelijk aan de in tabel 4.6 weergegeven waarden.

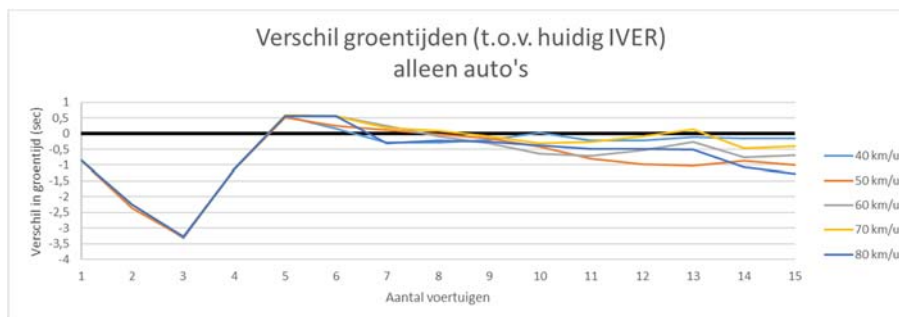
6.2 Resultaten detectieveld

6.2.1 Wachtrijscenario

In het eerste onderzochte scenario ontstaat elke cyclus van 120 seconden een wachtrij van één auto meer. Van elke cyclus is vervolgens de duur van de groenfase gelogd en vergeleken met de resultaten van het huidige IVER-detectieveld. De verschillen in de benodigde groentijd zijn weergegeven in figuur 6.1. Uit deze grafiek blijkt dat de groentijden van het nieuwe detectieveld korter zijn dan met het huidige IVER-detectieveld. De grootste verschillen ontstaan bij wachtrijen van 2 tot 4 voertuigen. Dit wordt verklaard doordat in het huidige detectieveld langer doorverlengd moet worden op de koplus, omdat deze lus al het verkeer tot aan de lange lus moet afwikkelen. In de nieuwe vormgevingen ligt de tweede lus dichterbij, waardoor er eerder overgestapt kan worden naar verlengen op de tweede lus. Het verschil loopt op tot maximaal 3 seconden.

Bij een wachtrij van 5 of 6 voertuigen valt in het huidige IVER-detectieveld bij 80 km/h de lange lus af, op het moment dat het verkeer nog relatief langzaam rijdt. Hierdoor is de geelbenutting bij 6 voertuigen in het huidige IVER-detectieveld hoog en kunnen automobilisten in de problemen worden gebracht. Dit verklaart de toename van de groentijd bij de nieuwe detectievelden, waar beter gestuurd kan worden op de geelbenutting. Vanaf 8 voertuigen is het verschil in groentijd bij snelheden van 40-70 km/h minimaal. Bij 80 km/h is de benodigde groentijd structureel lager.

³ In de praktijk is het beter om de tijden te starten nadat de koplus is vrijgefallen. Op deze manier worden de tijden gekoppeld aan het in beweging komen van de wachtrij. In de simulatieomgeving heeft dit aspect geen invloed. Door het koplusmaximum is dit direct begrensd op een instelbare bovengrens.



Figuur 6.1: Verschillen in groentijden bij verkeer in een wachtrij

Benutte geeltijd

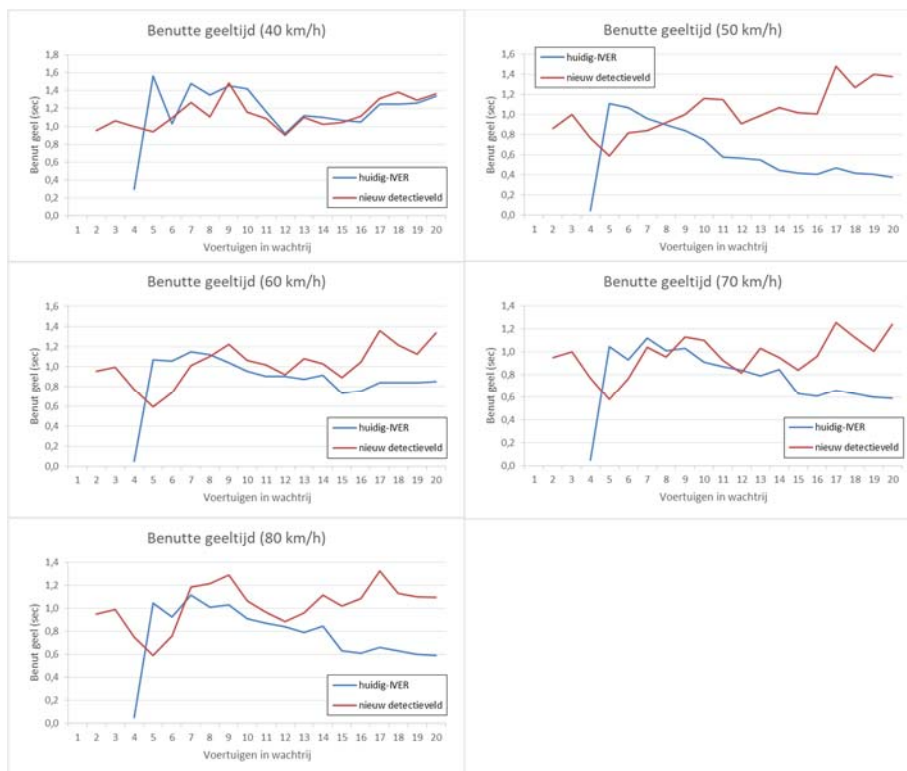
In de simulaties is de benutte geeltijd bepaald door te analyseren wanneer de koplus in de geelfase voor het laatst afvalt. De tijd tussen startgeel en het afvallen van de koplus is vervolgens als maat genomen voor de benutte geeltijd. De kop van het voertuig is op dat moment dus de stopstreep al gepasseerd.

De grootste verschillen tussen het huidige IVER-detectieveld en het nieuwe detectieveld zijn te zien bij korte wachtrijen (2 à 3 voertuigen) en bij lange wachtrijen (>15 voertuigen). In het huidige detectieveld neemt de benutte geeltijd af naarmate de wachtrij langer wordt. In het nieuwe detectieveld neemt de benutte geeltijd juist toe naarmate de wachtrij langer wordt. De benutte geeltijd ligt in alle snelheidsvarianten met het nieuwe detectieveld hoger dan in het huidige IVER-detectieveld. De benutte geeltijd van het nieuwe detectieveld ligt bij 60, 70 en 80 km/h iets onder de voorgestelde grens van 40% van de geeltijd.

Bij korte wachtrijen is het probleem van het huidige IVER-detectieveld dat de vastgroentijd hoog is, waardoor het tweede en derde voertuig vrijwel nooit geel getoond zien. Pas vanaf het vierde voertuig wordt een deel van de geeltijd benut. Bij het nieuwe detectieveld is de benutte geeltijd van het tweede voertuig ongeveer 1 seconde.

Bij lange wachtrijen blijft de benutte geeltijd van het nieuwe detectieveld vrij constant, doordat gebruik gemaakt wordt van dynamische hiaattijden en het afschakelen van detectielussen. Bij het huidige IVER-detectieveld is te zien dat de benutte geeltijd steeds lager wordt, als gevolg van het feit dat de snelheid toeneemt.

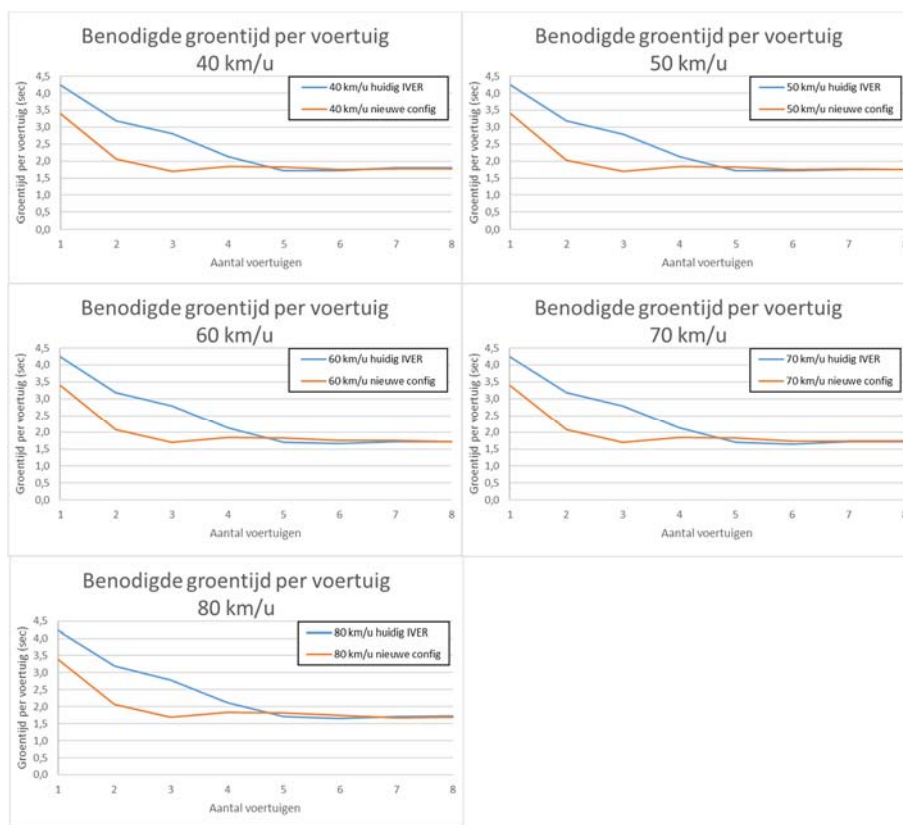
In figuur 6.2 is het verloop van de benutte geeltijd weergegeven voor verschillende snelheden en bij verschillende wachtrijlengten.



Figuur 6.2: Benutte geeltijd bij verschillende wachtrijlengten (40, 50, 60, 70 en 80 km/h, wachtrijscenario)

Benodigde groentijd per voertuig

In de loop van de groenfase neemt de benodigde groentijd per voertuig af. Het verschil tussen het huidige IVER-detectieveld en het nieuwe detectieveld is goed terug te zien tot de eerste 6 voertuigen. In figuur 6.3 is de groentijd per voertuig weergegeven voor de verschillende snelheden. Vanaf voertuig 6 is het verschil in benodigde groentijd per voertuig minimaal. De winst van het nieuwe detectieveld is, in geval van wachtende voertuigen, dat korte wachtrijen efficiënter afgewikkeld worden.



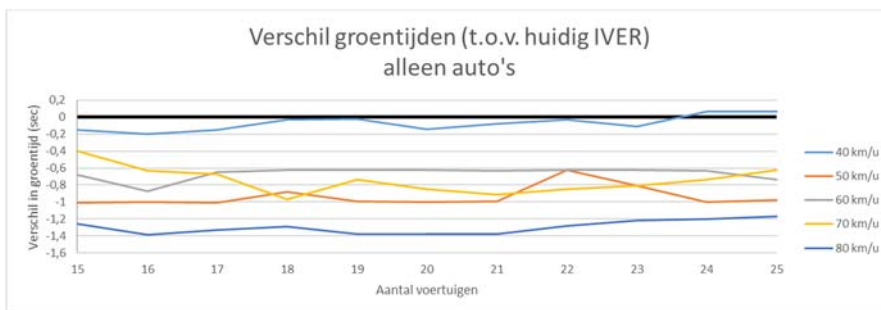
Figuur 6.3: Benodigde groentijd per voertuig bij 40, 50, 60, 70 en 80 km/h (voertuigen 1 tot en met 8, wachtrijsenario)

6.2.2 Scenario verkeer op snelheid

Wanneer verkeer eenmaal op snelheid is, speelt het moment van geelsturing een grote rol in de veiligheid en efficiëntie. Als, in het huidige IVER-detectieveld bij 80 km/h, een voertuig de lange lus verlaat, bevindt de kop van het voertuig zich op ongeveer 15 meter van de stopstreep. Dit zorgt voor een lage geelbenutting. In de nieuwe detectievelden kan nauwkeuriger gestuurd worden op geel. Hierdoor neemt de benutte geeltijd, zeker bij 80 km/h toe. Bij 40 km/h is het verschil beperkt, doordat de benutte geeltijdfractie in het huidige IVER-detectieveld al ongeveer 40% is.

Door de mogelijkheid om dynamische haattijden toe te passen en lussen vroegtijdig uit te schakelen, ontstaat een hogere geelbenutting van 0,5 seconde bij 60 km/h tot 1,5 seconde bij 80 km/h.

In figuur 6.4 zijn de verschillen in groentijden ten opzichte van het huidige IVER-detectieveld inzichtelijk gemaakt.



Figuur 6.4: Verschillen in groentijden bij doorrijdend verkeer

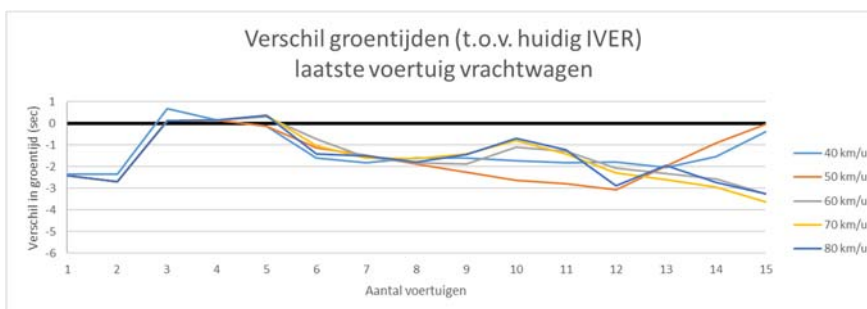
6.2.3 Scenario vrachtverkeer

Voor het bepalen van de effecten van het nieuwe detectieveld op vrachtverkeer is het wachtrijscenario aangepast. Hierbij is het laatste voertuig in de wachtrij vervangen door een vrachtwagen (11 meter). Als de vrachtwagen het laatste voertuig in de wachtrij is, wordt deze niet 'geholpen' door aanwezig autoverkeer achter het voertuig. Dit is het meest ongunstige scenario.

Uit de analyse blijkt dat het huidige IVER-detectieveld leidt tot een groot aantal 'gevangen' vrachtwagens. Deze vrachtwagens die deel uitmaken van de wachtrij, trekken te langzaam op om binnen de hiaattijd de volgende lus te bereiken. Dit gebeurt in ongeveer 11% van de gevallen. Deze situaties zijn voor de vergelijking van de groentijden gefilterd uit de dataset. In het nieuwe detectieveld wordt in slechts 1% van de gevallen een vrachtwagen 'gevangen'.

Uit de vergelijking van de groentijden tussen het huidige IVER-detectieveld en het nieuwe detectieveld blijkt dat het nieuwe detectieveld beter presteert. Bij een wachtrij van 1 of 2 voertuigen is ongeveer 2,5 seconden minder groen nodig. Bij een wachtrij van 3 tot 5 voertuigen levert het huidige IVER-detectieveld iets kortere groentijden op; dit komt doordat de vrachtwagen, bij het verlaten van de lange lus, nog een relatief lage snelheid heeft en daardoor een hoge benutte geeltijd heeft. Bij wachtrijen van 6 of meer voertuigen presteert het nieuwe detectieveld structureel beter, met groentijden die circa 2 seconden korter worden.

In figuur 6.5 is het verschil in benodigde groentijd weergegeven voor dit scenario.



Figuur 6.5: Verschillen in groentijden bij wachtrijen met een vrachtwagen als laatste voertuig

6.3 Conclusies

Het detectieveld dat op basis van een mechanicamodel is bepaald, blijkt in de simulatie goed te presteren op zowel efficiëntie als verkeersveiligheid. Wanneer het verkeer vanuit stilstand vertrekt, is de regeling beter in staat hierop te acteren, door de dynamische hiaattijden en het afschakelen van detectielussen. Ook het moment van geelsturing is beter te beïnvloeden, waardoor de benutte geeltijd constanter wordt (tot 40% van de geeltijd). De geelbenutting neemt toe met 0,5 seconde bij 60 km/h tot 1,5 seconde bij 80 km/h. Bij wachtrijen van 5 of 6 voertuigen levert het huidige IVER-detectieveld iets kortere groentijden op, doordat de benutte geeltijd relatief hoog is. Dit is nadelig voor de verkeersveiligheid.

De winst van het nieuwe detectieveld ontstaat enerzijds bij wachtrijen tot 4 voertuigen. Door een tweede lus op 12 meter toe te passen, is de groentijd korter en de benutte geeltijd hoger. Dit zorgt voor een winst van maximaal 3 seconden per groenfase. Anderzijds is er een verbetering voor de afwikkeling van verkeer dat op snelheid aankomt.

De afwikkeling van vrachtverkeer verloopt beter met het nieuwe detectieveld. Doordat vrachtverkeer vrijwel continu een van de lussen bezet, is het mogelijk om ook voor het vrachtverkeer op een goed moment naar geel te sturen. De benodigde groentijden zijn ongeveer 2 seconden korter dan bij het huidige IVER-detectieveld en de kans om een vrachtwagen te 'vangen' daalt van 11 naar 1%.

7

Signaalgroep-afhandeling

De toolkits voor verkeersregelprogramma's kennen een signaalgroepafhandeling. De signaalgroepafhandeling en voorwaarden daarbinnen maken deel uit van de toolkits en vallen daarmee buiten de scope van dit onderzoek. Wel moet de IVER-detectieafhandeling functioneren binnen de signaalgroepafhandeling van de toolkits. In tabel 7.1 zijn de signaalgroep-toestanden van de meest gebruikte toolkits (ccol en RWS C) weergegeven.

	ccol	RWS C	
rood voor aanvraag afwikkeling	RV	WR	wachtrood
rood na aanvraag afwikkeling	RA	ROG	recht op groen
		RVG	rood voor groen
voorstartgroen	VS		
vastgroen	FG	VG	vastgroen
		VAG1e	eerste verlenggroen
wachtgroen	WG	WG	wachtgroen
verlenggroen	VG	VAG2e	tweede verlenggroen
meeverlenggroen	MG	MVG	meeverlenggroen
geel	GL	GL	geel

Tabel 7.1: Signaalgroep-toestanden ccol en RWS C

De IVER-detectieafhandeling heeft -onder voorwaarden- invloed op een aantal toestanden:

- Het zetten van een aanvraag voor groen (de overgang van RV naar RA in ccol en die van ROG naar RVG in RWS C).
- Het wel of niet vasthouden van het verlenggroen (VG voor ccol en VAG1e en/of VAG2e voor RWS C).
- Het vasthouden van het meeverlenggroen (MG voor ccol en MVG voor RWS C) voor veiligheidsgroen.

Als niet meer aan de vasthoudvoorwaarden voor verleng- en meeverlenggroen wordt voldaan, gaat de signaalgroep naar geel. De belangrijkste vasthoudvoorwaarde is de aanwezigheid van verkeer in het op dat moment actieve verlenggebied. Er kunnen ook andere voorwaarden voor het vasthouden zijn zoals koppelingen en meeverlengmogelijkheden. In dit hoofdstuk wordt niet zoals in de rest van het onderzoeksrapport

gesproken over geelsturing, maar over de manier waarop het groen in verlenggroen en meeverlenggroen wordt vastgehouden.

De nieuwe IVER-detectievelden zijn gebaseerd op de resultaten van het mechanica en simulatie onderdeel van dit onderzoek. Locatiespecifieke situaties op straat maken het nodig om de variabele hiaattijden en de geldigheidsgebieden van de verschillende detectielussen in te regelen. Ook vanuit verkeerskundig beheer kan het bijregelen ervan nodig zijn. Het is daarom verstandig in het verkeersregelprogramma uitgebreide instelmogelijkheden voor het aanwezige detectieveld op te nemen. Advies is om voor alle detectielussen variabele hiaattijden en instelbare verlenggebieden op te nemen, ook als dat vanuit dit onderzoek niet nodig lijkt.

7.1 Groenaanvraag

Een detectiemelding leidt tot een groenaanvraag. In principe hebben alle lussen uit de IVER-detectieconfiguratie een aanvraagfunctie. Hiervan kan worden afgeweken voor de verweglussen als er veel verkeer is dat niet via de bij de lus behorende signaalgroep rijdt, waardoor anders te veel valse aanvragen ontstaan. Een aanvraag wordt meege-nomen als de signaalgroep rood is. Een aanvraag kan eventueel conditioneel tot stand komen:

- Na het verstrijken van een bezettijd. Dit wordt vooral gebruikt voor koplussen in verband met verkeer aanrijden door parallel afslaand verkeer.
- Niet gedurende geel of niet tijdens het lopen van de garantieroodtijd:
 - Voor drukknoppen kan de aanvraag al gedurende geel worden onthouden of gedurende de garantieroodtijd worden gezet (als er wordt gedrukt, staat er iemand te wachten).
 - Voor detectielussen op korte afstand van de stopstreep wordt de aanvraag pas na het aflopen van de garantieroodtijd gezet (risico op valse aanvraag door roodlichtnegatie).
 - Voor detectielussen op voldoende afstand van de stopstreep kan de aanvraag al gedurende de garantieroodtijd worden gezet (geen of slechts zeer beperkt risico op valse aanvraag door roodlichtnegatie). Dit geldt voor de lussen die minimaal 2 seconden stroomopwaarts van de stopstreep liggen. Op de lussen tussen de stopstreep en dit punt moet een aanvraag pas na het verstrijken van de garantieroodtijd gezet worden.

7.2 Vasthouden verlenggroen

De bestaande IVER-detectieafhandeling kent 4 verlengtoestanden (VAG1, VAG2, VAG3 en VAG4). De nieuwe IVER-detectievelden kennen een grote flexibiliteit in instelmogelijkheden met variabele hiaattijden en instelbare geldigheidsgebieden voor alle detectielussen. Dit leidt tot veel mogelijkheden waardoor het complex is om unieke en inzichtelijke verlengtoestanden te definiëren. Om deze reden is ervoor gekozen om in de nieuwe IVER-detectieafhandeling geen onderscheid meer te maken in verschillende verlengtoestanden. Inzicht in het actieve verlenggebied kan via een parameter worden weergegeven (eerste actieve verlenglus vanaf de stopstreep gerekend).

De noodzaak voor het vasthouden van verlenggroen wordt bepaald op basis van de bezetting van lussen, het actief zijn van lussen en het lopen van hiaattijden. Voor signaalgroepen met meerdere rijstroken wordt dit per rijstrook bepaald. Afhankelijk van de wens van de wegbeheerder kunnen rijstroken niet meer worden meegenomen, zodra het verlengcriterium afvalt of actief blijft zolang er een rijstrook is met een verlengcriterium (ook wel 'opdrempelen' genoemd). Op basis van de efficiëntie is de standaardinstelling dat een rijstrook niet meer wordt meegenomen zodra het verlengcriterium afvalt. Een wegbeheerder kan een andere keuze maken voor situaties waarin comfort een belangrijke rol speelt of waarin een opsplitsing van één rijstrook naar twee rijstroken dit nodig maakt (grotere hiaten opvangen door herverdeling verkeer).

Als de maximumgroentijd of verlenggroentijd korter is dan de geldigheidsgebieden van een lus wordt het verlenggroen beëindigd. Dit ongeacht de aanwezigheid van verkeer. Binnen RWS C kan worden gekozen om de IVER-detectieafhandeling alleen in VAG2e te laten plaatsvinden of zowel in VAG1e als VAG2e.

De geldigheidstijden en hiaatgebieden van de lussen worden pas gestart na het afvallen van de koplus ('het rijden van het eerste voertuig'). Op deze manier zijn de tijden gekoppeld aan het in beweging komen van de wachtrij. Door het koplusmaximum is de start van de geldigheidstijden en hiaatgebieden direct begrensd op een instelbare bovengrens. Indien gewenst, kan hiervoor ook een aparte tijd met een eigen instelling worden gebruikt.

Wanneer verkeer op snelheid aankomt, zoals bijvoorbeeld bij een wachtstandsituatie, is het noodzakelijk dat de regeling direct overstapt op de hiaattijden die passen bij verkeer dat al op snelheid is. De regeling moet dus in staat zijn 'over te springen' van het wachtrijscenario naar het scenario met verkeer op snelheid. Dit is het geval als er op startgroen geen detectie is op de eerste twee lussen (bij snelheden tot 60 km/h) of drie lussen (bij snelheden van 70 of 80 km/h). Dit betekent dat in die situaties direct voor alle lussen overgestapt wordt op de lage hiaattijden en de betreffende eerste lussen direct worden uitgeschakeld. Uit oogpunt van flexibiliteit is dit voor de derde lus voor alle snelheden instelbaar.

7.3 Vasthouden meeverlenggroen

Het meeverlenggroen kan worden vastgehouden als nog verkeer aanwezig is in het detectieveld en er een onveilige situatie kan ontstaan. Deze situatie wordt veiligheidsgroen genoemd.

Veiligheidsgroen wordt niet toegekend wanneer op een rijstrook na het verlopen van de maximumgroentijd of verlenggroentijd nog verkeer aanwezig is (niet verlengen van de verstreken maximumgroentijd). Veiligheidsgroen wordt alleen toegekend op rijstroken die niet meer actief het verlenggroen vasthouden. Dit betreft dus rijstroken die niet meer worden meegenomen door eerdere hiaat of signaalgroepen die in meeverlenggroen staan. Hierbij wordt de systeemronde meeverlenggroen die actief kan zijn in de overgang van verlenggroen naar geel, uitgesloten.

Veiligheidsgroen kan alleen actief worden als er een onveilige situatie kan ontstaan. Dit is het geval als meer dan één voertuig in het verlenggebied aanwezig is. Als er één voertuig in het verlenggebied is, kan dit voertuig zowel veilig stoppen als doorrijden. Als meer dan één voertuig in het verlenggebied aanwezig is en het voorste voertuig nog kan stoppen, kan een onveilige situatie ontstaan. Dit gebeurt als het voorste voertuig besluit te stoppen en een erachter rijdend voertuig besluit door te rijden. Tijdens veiligheidsgroen mogen andere signaalgroepen niet meeverlengen met de signaalgroep met veiligheidsgroen.

8

Contractdocumenten

De laatste pijler is de contractvorming. Het huidige IVER-stuk blijkt hiervoor moeilijk bruikbaar: de wegbeheerders krijgen niet altijd wat ze in gedachten hebben of er ontstaat discussie over het toe te passen detectieveld. De nieuwe detectiestandaard moet eenduidig en helder zijn, zodat het goed bruikbaar is in aanbestedingen.

Om de gewenste eenduidigheid en helderheid te realiseren, zijn de detectievelden en de achterliggende uitgangspunten opgenomen in een rekentool. De rekentool bepaalt op basis van diverse kenmerken van de situatie de bij het detectieveld behorende parameterinstellingen. In te voeren kenmerken zijn detectieveld, rekensnelheid, geelbenutting en geeltijd. De rekentool geeft naast de parameters ook opmerkingen over de ingevulde situatie en de haalbaarheid van de benutte geeltijd.

De rekentool kan, met een handleiding voor het gebruik, worden gebruikt door de wegbeheerder of worden meegegeven als contractstuk. Aannemers moeten bij het gebruik van de rekentool de bijbehorende (wegbeheerders)eisen invullen. Vrij in te vullen parameters moeten ter goedkeuring aan de aanbesteder worden voorgelegd. Opmerkingen uit de rekentool moeten worden geduid door de aannemer en de gegeven verklaringen voor de opmerkingen moeten worden goedgekeurd door de aanbesteder.

Via deze werkwijze is voor de wegbeheerder duidelijk op welke uitgangspunten de detectievelden en parameterinstellingen zijn gebaseerd. Ook is duidelijk in hoeverre aan de wegbeheerderseisen en -wensen ten aanzien van het detectieveld wordt voldaan en is de reden van afwijkingen onderbouwd. Deze informatie biedt de wegbeheerder handvatten om zelf een detectieveld te ontwerpen of om het voorstel ervoor van de aannemer goed te keuren of om bijstelling ervan te vragen.

De rekentool is via de IVER-pagina op de CROW-website te downloaden.

Conclusies en aanbevelingen

In het onderzoek is vanuit verschillende invalshoeken een nieuwe vormgeving van het detectieveld ontwikkeld. Bij het ontwikkelen van het detectieveld zijn de hiernavolgende punten bepalend geweest. De conclusies van het onderzoek zijn beschreven in paragraaf 9.1. De nieuwe vormgeving van het detectieveld is opgenomen in paragraaf 9.2. De beantwoording van de onderzoeksvragen is opgenomen in bijlage 1.

9.1 Conclusies

Invalshoek literatuur

Vanuit de literatuur blijkt dat het huidige detectieveld op een aantal punten niet aansluit bij het gedrag dat weggebruikers gewoonlijk laten zien. Twee belangrijke parameters hierbij zijn de reactietijd en de remvertraging. Beide parameters beïnvloeden de stopafstand, waardoor deze groter is dan waarmee in het huidige detectieveld rekening is gehouden. Daarnaast is het huidige detectieveld voornamelijk gebaseerd op wachtrijafwikkeling en niet of nauwelijks op de afhandeling van verkeer dat met de toegestane maximumsnelheid komt aanrijden. Ontwikkelingen in het veld van de verkeersregeltechniek hebben geleid tot nieuwe richtlijnen, onder andere voor de instelling voor de geeltijd.

Voor het detectieveld worden drie functies onderscheiden: aanvragen van de groenfase, verlengen van de groenfase en het tellen van voertuigen ten behoeve van monitoring en evaluatie.

Invalshoek mechanica

Vanuit de invalshoek van de mechanica is het detectieveld theoretisch herontworpen, op basis van de in de literatuur gevonden parameters. Hieruit is een aantal kernpunten gevonden die geleid hebben tot het nieuwe detectieveld:

- Tweede lus dichters naar de stopstreep: uit het mechanisch model blijkt dat in het huidige IVER-detectieveld te lang moet worden verlengd op de koplus. Dit leidt tot inefficiëntie van de groenbenutting. De tweede lus ligt daarom dichters bij de stopstreep.
- Lussen uitschakelen: als het verkeer op snelheid is, moeten de lussen die dicht bij de stopstreep liggen, voor het verlengproces uitgeschakeld worden. Hierdoor kan een deel van de geeltijd benut worden, zonder dat dit tot gevaarlijke situaties leidt.

- Onderscheid aanvraag- en verlengpunt: bij snelheden tot 70 km/h ligt het aanvraagpunt dicht bij de stopstreep dan het eindpunt van het verlenggebied. Hierdoor is het verlenggebied bepalend voor de positionering van de lussen.
- Benut geel laten toenemen met snelheid: gedurende de groenfase neemt de snelheid toe, waardoor de minimale stopafstand en -tijd toenemen. Als gevolg hiervan kan een steeds groter deel van de geelfase veilig benut worden, omdat de minimale stopafstand steeds groter wordt.
- Vrachtverkeer: doordat de lussen in een groot gedeelte van het detectieveld een tussenruimte van 10 tot 13 meter hebben, kunnen vrachtwagens vrijwel niet 'verdwijnen'. Het detectieveld biedt dus een goede basis voor de afwikkeling van het vrachtverkeer.

Invalshoek data-analyse

Het huidige IVER-detectieveld kent de mogelijkheid om bij 80 km/h een lus op 114 meter toe te passen. In het veldonderzoek is de aanvraag- en verlengfunctie van deze lus onderzocht. Vanuit de data blijkt dat er een afname is van de verkeersonveiligheid als op de 114-meterlus wordt aangevraagd en verlengd. Dit bevestigt het beeld dat de gewenste remvertraging lager is dan waarmee in het huidige IVER-detectieveld gerekend wordt.

Invalshoek simulaties

Het nieuw ontworpen detectieveld is in een microsimulatiemodel opgenomen om te toetsen hoe de verkeersafwikkeling verandert als gevolg van de gewijzigde detectievormgeving. Uit de simulatie blijkt dat de verkeersafwikkeling verbetert als gevolg van de nieuwe detectieconfiguratie. De winst ontstaat voornamelijk bij wachtrijen tot 5 voertuigen en bij voertuigen die op snelheid het kruispunt naderen (wachstand-roodsituatie). Daarnaast bevordert het gebruik van dynamische hiaattijden en het uitschakelen van detectielussen de efficiëntie van de verkeersregeling. De benutte geeltijd neemt toe naarmate de wachtrij langer wordt. Dit sluit goed aan bij de toenemende snelheid tijdens de groenfase. Hierdoor verbetert de verkeersveiligheid.

Expert judgement

Het ontwikkelde detectieveld biedt een goede basis voor het aanvragen en verlengen van de groenfase en het monitoren van verkeer, maar de praktijk kan weerbarstig zijn. Bij het gebruik van het detectieveld is een aantal aandachtspunten van belang:

- Wachtrij in beweging: het gebruik van dynamische hiaattijden dient rekening te houden met het in beweging komen van de wachtrij. De reactietijd van weggebruikers kent geen vaste waarde, maar varieert. Door gebruik te maken van een vrijkomfunctie op de koplus wordt een deel van deze variaties opgevangen.
- Maatwerk: ondanks het feit dat het detectieveld op papier goed presteert, blijft het in de praktijk uitermate belangrijk om na te blijven denken over de specifieke situatie. Zaken waarmee nu geen rekening is gehouden, zijn bijvoorbeeld hellingen, file stroomafwaarts, niet-geregelde parallelwegen en situaties met (veel) bijzondere voertuigen.
- Ruimtegebrek: in de praktijk, zeker in stedelijk gebied, is er vaak geen mogelijkheid om het volledige detectieveld aan te leggen. Dit valt in een richtlijn niet af te dekken en vereist dus maatwerk.

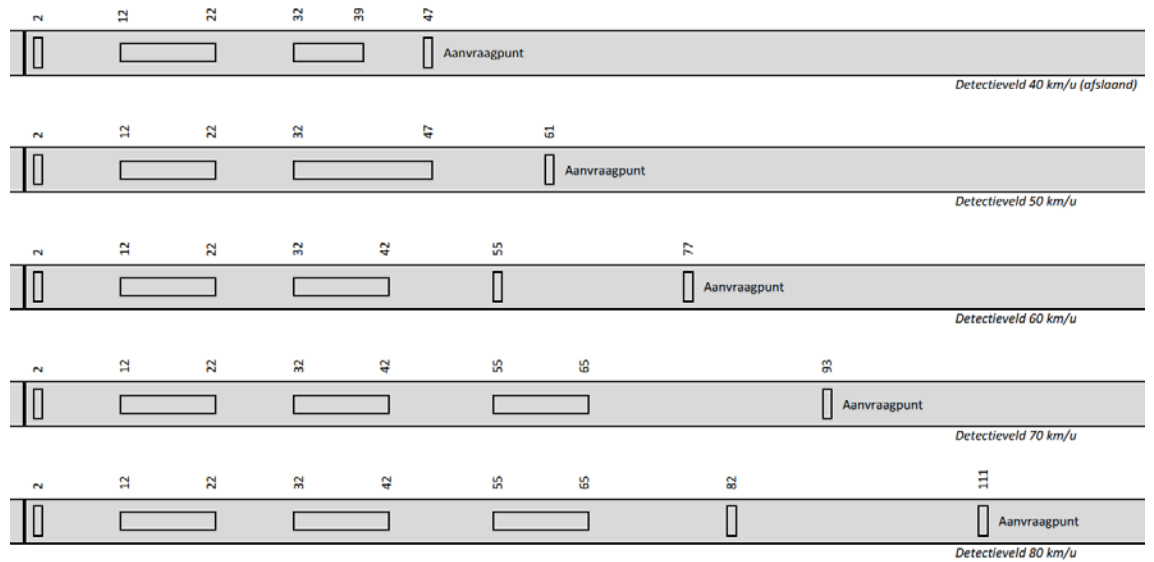
9.2 Resulterende detectieveld

Het resultaat van het onderzoek is een detectieveld met een aantal standaardinstellingen. In de hiernavolgende paragrafen zijn de detectievelden en bijbehorende instellingen voor het gemotoriseerde en langzame verkeer weergegeven.

9.2.1 Gemotoriseerd verkeer

In figuur 9.1 is het detectieveld weergegeven voor het gemotoriseerde verkeer. De figuur geeft enkel de positie van de lussen weer; de keuze van de vormgeving van de lussen (recht, schuin etc.) staat vrij.

De bijbehorende tijdselementen zijn weergegeven in tabel 9.1.



Figuur 9.1: Ontworpen detectievelden gemotoriseerd verkeer

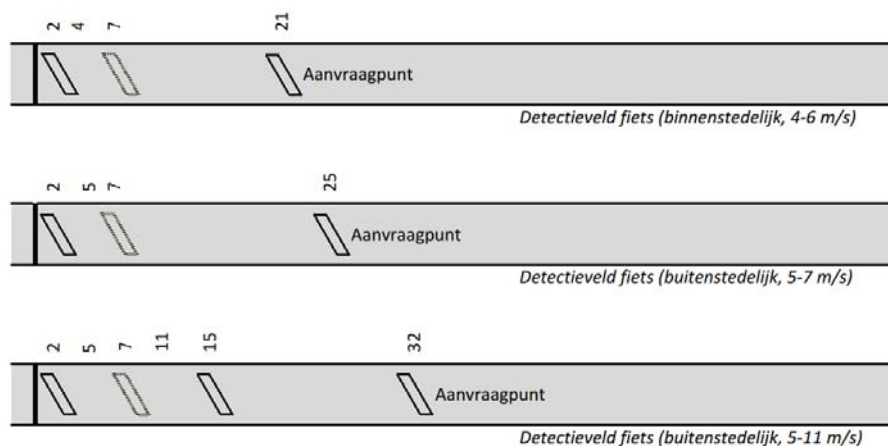
snellheid	detector	begin (m)	eind (m)	t1 (sec.)	t2 (sec.)	h1 (sec.)	h2 (sec.)	maximum (sec.)
40 km/h	d1	1	2	-	-	0,0	0,0	8
	d2	12	22	-	-	0,1	0,1	-
	d3	32	39	-	-	1,5	1,5	-
	d4	46	47	-	-	1,0	1,0	-
50 km/h	d1	1	2	-	-	0,0	0,0	8
	d2	12	22	-	-	0,1	0,1	10
	d3	32	47	10	22	2,0	0,7	-
	d4	60	61	-	-	2,5	2,5	-
60 km/h	d1	1	2	-	-	0,0	0,0	8
	d2	12	22	-	-	0,1	0,1	10
	d3	32	42	10	20	2,0	0,3	-
	d4	55	56	-	-	1,5	1,5	-
	d5	76	77	-	-	2,5	2,5	-
70 km/h	d1	1	2	-	-	0,0	0,0	8
	d2	12	22	-	-	0,1	0,1	10
	d3	32	42	12	20	1,5	0,0	25
	d4	55	65	15	30	3,5	1,0	-
	d5	92	93	-	-	2,5	2,5	-
80 km/h	d1	1	2	-	-	0,0	0,0	8
	d2	12	22	-	-	0,1	0,1	10
	d3	32	42	12	20	1,0	0,0	20
	d4	55	65	15	30	1,5	0,5	-
	d5	82	83	20	40	3,0	1,0	-
	d6	110	111	-	-	2,0	2,0	-

Tabel 9.1: Instellingen tijdselementen van detectielussen gemotoriseerd verkeer

9.2.2 Fietsverkeer

In figuur 9.2 is het detectieveld weergegeven voor het (brom)fietsverkeer. De figuur geeft enkel de positie van de lussen weer; de keuze van de vormgeving van de lussen (recht, schuin etc.) staat vrij.

De bijbehorende tijdselementen zijn weergegeven in tabel 9.2.



Figuur 9.2: Ontworpen detectieveld (brom)fietsers

snelheid	detector	begin (m)	eind (m)	hiaattijd (sec.)	maximum (sec.)
binnenstedelijk (4-6 m/s)	d1	1	1,5	0,0	8
	d2	6,5	7	0,5	-
	d3	20,5	21	3,0	-
buitenstedelijk fiets (5-7 m/s)	d1	1	1,5	0,0	8
	d2	6,5	7	0,5	-
	d3	24,5	25	3,3	-
buitenstedelijk bromfiets (5-11 m/s)	d1	1	1,5	0,0	8
	d2	6,5	7	0,0	-
	d3	14,5	15	1,2	-
	d4	31,5	32	3,0	-

Tabel 9.2: Instellingen tijdselementen van detectielussen fietsverkeer

10

Literatuurlijst

Agentschap Wegen en Verkeer (2009). *Vademecum Veilige Wegen en Kruispunten*, Vlaamse overheid - AWV, Brussel, België

Chang, M. S., Messer, C. J., & Santiago, A. J. (1985). *Timing traffic signal change intervals based on driver behavior* (No. HS-040 068)

CROW (2009). *Handboek aanleg verkeersregelininstallaties*, publicatie 296, Ede

CROW (2013). *Richtlijn ontruimingstijden verkeersregelininstallaties*, publicatie 321, Ede

CROW (2014). *Handboek verkeerslichtenregelingen*, publicatie 343, Ede

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2010). *Richtlinien für Lichtsignalanlagen RiLSA. Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr*, FGSV, Keulen, Duitsland

Gates, T. J., Noyce, D. A. & Laracuenta, L. (2007). Analysis of dilemma zone driver behavior at signalized intersections. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2030(1), 29-39

Highways Agency (2002). *Siting Of Inductive Loops For Vehicle Detecting Equipments At Permanent Road Traffic Signal Installations*, Highways Agency, Londen, Verenigd Koninkrijk

Highways Agency (2005). *Installation Guide for MOVA*, Highways Agency, Londen, Verenigd Koninkrijk

IVER (2001). *Signaalgroepafwikkeling en Detectieconfiguratie*, Nederland

McGee, Sr., H., K. Moriarty, K. Eccles, M. Liu, T. Gates, and R. Retting. NCHRP Report 731: Guidelines for Timing Yellow and All-Red Intervals at Signalized Intersections. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2012

Misdom, L. (2007). *Detectieconfiguratie geconfigureerd. De detectieconfiguratie afgestemd op de functie van de weg*. NHTV, Breda

Misdom, L. en Burgt, G. van der (2009, oktober). Groen op Maat. *Verkeerskunde*, 06-09, 39-43.

Oppedijk, W.J.C., Krol, L., Geerligs, W., en Prinsen, L. (2012). *Onderzoek ontruimingstijden. Resultaten bureau- en veldonderzoek*, Goudappel Coffeng, Deventer

Prinsen, L. en Krol, L., (2012). *Wachtstand verkeerslichten. Verkenning invloedsfactoren*, Goudappel Coffeng, Deventer

Prinsen, L., Dicke-Ogenia, M., Krol, L., Zengerink, L. en Hulleman, K. (2016). *Onderzoek geeltijden*, Goudappel Coffeng, Deventer

Van Rij, M.L.D. (2001). *Afwikkeling eerste deel wachtrij. Onderzoek naar het vertrek van voertuigen bij verkeerslichten*, Grontmij, De Bilt

Bijlage 1

Onderzoeksvragen

1. Hoe kan het stuk 'IVER detectieconfiguratie en signaalgroepafwikkeling' verbeterd worden op het gebied van een veilige geelsturing?

Toelichting:

Aanleiding voor deze onderzoeksvraag is het onderzoek geeltijden (IVER/Goudappel Coffeng 2016). Hieruit is gebleken dat de huidige IVER-detectieconfiguratie niet altijd tot een veilige geelsturing kan leiden.

Beantwoording:

Uit het onderzoek naar de geeltijden bleek dat het eerste detectiepunt in de huidige IVER-richtlijn te dicht bij de stopstreep ligt. In het nieuwe detectieveld ligt het eerste detectiepunt verder weg, waardoor de kans op gevaarlijke situaties afneemt. Dit is bevestigd in het data-onderzoek op de Utrechtse kruispunten.

Het nieuwe detectieveld gaat uit van een geelbenutting van ongeveer 40% van de groenfase, maar de rekentool biedt de mogelijkheid om andere waarden te hanteren (tot 50%).

2. Hoe kan het stuk 'IVER detectieconfiguratie en signaalgroepafwikkeling' verbeterd worden op het gebied van een veiliger dilemmazone?

Toelichting:

Eveneens uit het onderzoek geeltijden is naar voren gekomen dat de IVER-detectieconfiguratie niet altijd goed de dilemmazone dekt.

Beantwoording:

De dilemmazone wordt beter afgedekt door het nieuwe detectieveld, voornamelijk doordat het eerste detectiepunt verder van de stopstreep ligt. Hierdoor is er in de dilemmazone beter inzicht waar de voertuigen zich bevinden.

3. Hoe kan het stuk 'IVER detectieconfiguratie en signaalgroepafwikkeling' verbeterd worden op het gebied van een detectieconfiguratie die past bij een optimale verkeersafwikkeling en signaalgroepafhandeling?

Toelichting:

Nieuwe inzichten en huidige ontwikkelingen zijn voeding om de beschreven signaalgroepafhandeling nog eens kritisch te bekijken en met goede onderbouwing te actualiseren. Hierbij kan gedacht worden aan zaken als dynamische hiaattijden.

Beantwoording:

In het huidige IVER-detectieveld blijkt de positionering van de detectielussen niet optimaal. Hierdoor moet, met name in het begin van de groenfase, lang verlengd worden op de koplus, als er geen verkeer meer is. Door de tweede lus dicht bij de koplus te positioneren, dynamische hiaattijden toe te passen en lussen af te schakelen in de loop van de groenfase, verbetert de verkeersafwikkeling. In de simulaties is dit aangetoond.

4. Hoe kan het stuk 'IVER detectieconfiguratie en signaalgroepafwikkeling' verbeterd worden om te kunnen dienen als basis, bijlage of verwijzingen in contracten?

Toelichting:

Vaak wordt het stuk 'Detectieconfiguratie en signaalgroepafwikkeling IVER' gebruikt als bijlage in contracten of wordt er op enigerlei wijze naar verwezen. Het huidige stuk is hiervoor echter niet geschikt, onder andere omdat diverse mogelijkheden worden aangegeven. Het aan te passen stuk moet zodanig worden vormgegeven dat het bruikbaar is in RAW- en UAV-gc-contracten, zowel als basis (dus met enige keuzevrijheid met betrekking tot EMVI of BVP), maar ook als gericht aan te wijzen onderdelen die van toepassing zijn of niet.

Beantwoording:

De ontwikkelde rekentool is de basis voor de contractstukken. De rekentool biedt flexibiliteit voor de aanbesteder om keuzes te maken met betrekking tot de gewenste geelbenutting. De aannemer moet de opmerkingen uit de rekentool duiden en ter goedkeuring aan de opdrachtgever voorleggen.

5. Hoe kan er, in relatie tot onderzoeksvraag 4, een keuzepallet opgesteld worden, zodat in contracten verwezen kan worden naar een bepaalde vormgeving die past bij een bepaalde doelstelling?

Toelichting:

Het stuk 'Detectieconfiguratie en signaalgroepafwikkeling IVER' moet zodanig worden aangepast dat in contracten eenvoudig verwezen kan worden naar bepaalde elementen, vormgeving en configuraties en moet kunnen dienen als bouwstenen in System Engineering, maar ook moet eenduidig zijn te verwijzen naar benoemde zaken in RAW of UAV-gc-contracten. Zaken moeten zo veel mogelijk algemeen (generiek) zijn, zodat wegbeheerders er specifieke zaken aan toe kunnen voegen. Maar tegelijkertijd moet de configuratie en signaalgroepafwikkeling dusdanig zijn afgebakend dat in de basis helder is wat geleverd moet worden in een project.

Beantwoording:

Voor verschillende snelheden (40, 50, 60, 70 en 80 km/h) zijn verschillende detectievelden ontworpen. De instelling van de haattijden is bepalend voor zowel de duur van het verlengen (grenshiaat) als voor de benutte geeltijd. De 'standaard'-instellingen bieden ruimte om hierin te variëren. De ontwikkelde rekentool en de bijbehorende handleiding bieden hulp bij het opstellen van het detectieveld.

Daarnaast kan een wegbeheerder, als de situatie daartoe aanleiding geeft, afwijken van het detectieveld dat hoort bij de toegestane maximumsnelheid. Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn als de werkelijke snelheid hoger of lager ligt dan de toegestane maximumsnelheid.

6. Welke verschillende doelstellingen passen bij de diverse detectieconfiguraties voor auto's en fietsers?

Toelichting:

Het keuzepallet zoals beschreven in onderzoeksvraag 5, moet doelstellingsgerelateerd worden opgezet. Anders gezegd; welke vormgeving (configuratie of afwikkeling) past bij welke doelstelling. Dit moet de wegbeheerder helpen projectdoelstellingen beter te kunnen vervatten in contracten.

Beantwoording:

Voor het auto- en fietsverkeer zijn verschillende detectievelden ontworpen voor verschillende snelheden. De wegbeheerder heeft daarmee de keuze welk detectieveld hij in de specifieke situatie wil toepassen. Voor het fietsverkeer is er daarnaast een mogelijkheid om te kiezen voor een extra detectielus bij grote fietsstromen of bij situaties waarin hogere snelheden structureel voorkomen of gefaciliteerd moeten worden. Het ontworpen detectieveld is in staat om het verkeer zowel veilig als efficiënt af te wikkelen. Daarnaast geldt dat in elk detectieveld korte lussen zijn toegepast, waardoor het verkeer geteld kan worden ten behoeve van monitoring en evaluatie.

7. Hoe kan het stuk 'IVER detectieconfiguratie en signaalgroepafwikkeling' aangepast worden, zodat lussen bij verschillende omstandigheden en snelheden op de optimale plaats komen te liggen?

Toelichting:

In de bijlage van het stuk 'Detectieconfiguratie en signaalgroepafwikkeling IVER' waarin tabellen met beslissingafstanden zijn opgenomen om bij verkeerslichten tot stilstand te kunnen komen. Deze zijn input voor het berekenen van de optimale locatie van de lussen. De IVER-detectieconfiguratie is daarmee dus een standaardconfiguratie, waarbij per geval en naar lokale omstandigheden de noodzaak bestaat te rekenen aan de optimale locatie van lussen, gerelateerd aan zowel de regimesnelheid, maar zeker ook aan de V85. In de praktijk gebeurt dit rekenen echter nauwelijks. Het stuk zal dus zodanig moeten worden aangepast dat als rekenen noodzakelijk blijft, dit niet in een bijlage is vervat maar als harde voorwaarde bij de configuratie is weergegeven. Daarnaast zijn de tabellen gestaafd op discutabele reactietijden, waarbij het ook niet helder is welke tijd gekozen moet worden. Dit geeft ook weer discussie in contracten en kan leiden tot een minder optimale ligging van lussen en aantallen lussen in een rijstrook of rijbaan.

Bij de oplossing kan gedacht worden in de richting van een rekentool voor detectieposities, en het weglaten van afstanden in de standaardconfiguratie.

Beantwoording:

Voor het auto- en fietsverkeer zijn verschillende detectievelden ontworpen voor verschillende snelheden. De wegbeheerder heeft daarmee de keuze welk detectieveld hij in de specifieke situatie wil toepassen.

8. Hoe kan het stuk 'IVER detectieconfiguratie en signaalgroepafwikkeling' zodanig worden aangepast dat het volledig los blijft staan van merken en modules en daarmee hulppersoonsonafhankelijk blijft?

Toelichting:

DE IVER is een onafhankelijke wegbeheerdersorganisatie. Stukken moeten derhalve altijd vrij blijven van voorgeschreven hulppersonen, merken, typen of modules die nodig zijn om de oplossing te laten werken. Het moet dus gaan om open standaarden die ook voor een ieder te programmeren en te standaardiseren zijn, zodat eenduidigheid geborgd is en daarmee niet vatbaar is voor meerdere interpretatie(s).

Beantwoording:

De ontworpen detectievelden beschrijven de posities van de detectiepunten, maar niet de manier waarop gedetecteerd moet worden. In de software moeten, voor een optimale werking, dynamische hiaattijden ondersteund worden en moeten lussen na verloop van tijd uitgeschakeld kunnen worden. De voor dit onderzoek toegepaste COOL-programmeercode is hiervoor vrij beschikbaar.

9. Op welke nog niet genoemde zaken is het raadzaam het stuk nader bij te tijd te brengen?

Toelichting:

De IVER-detectieconfiguratie gaat uit van een geeltijd van 4 seconden bij 80 km/h. Uit recent onderzoek is gebleken dat deze tijd aangepast moet worden. Deze aanpassingen zijn thans ook doorgevoerd in het Handboek verkeerslichtenregelingen CROW, en breed gedragen in het werkveld. Naast deze geeltijden zijn er wellicht nog andere zaken waarop het stuk 'Detectieconfiguratie en signaalgroepafwikkeling IVER' aangepast of geactualiseerd moet worden. Wij zien het als een voorwaarde om hier kritisch naar te kijken en waar nodig met voorstellen te komen van andere zaken die onderhevig zijn aan aanpassingen dan de lading van vorenstaande onderzoeksvragen dekt.

Beantwoording:

In het nieuwe detectieveld zijn veel veranderingen doorgevoerd ten opzichte van de huidige IVER-standaard. Met deze actualisatie is het detectieveld consistent met de reeds aangepaste CROW-richtlijn Handboek verkeersregelinstantaties (CROW, 2013) en de Richtlijn ontruimingstijden (CROW, 2014).

Bijlage 2

Instelling theoretische hiaattijden

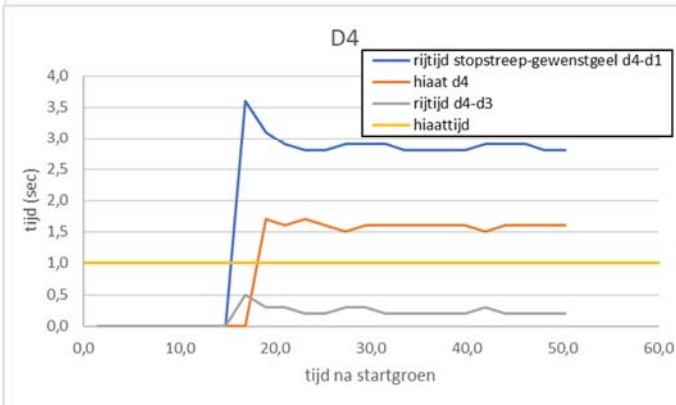
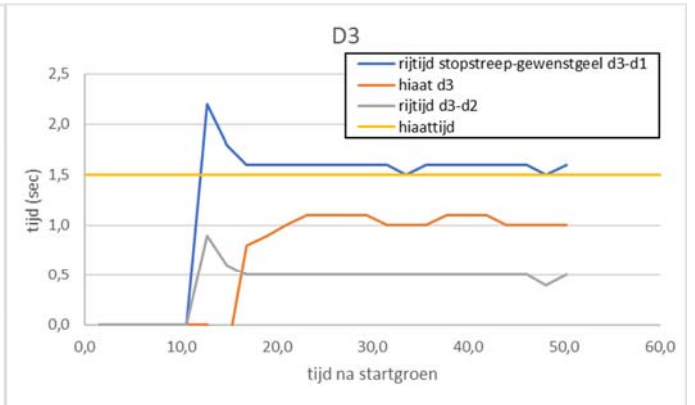
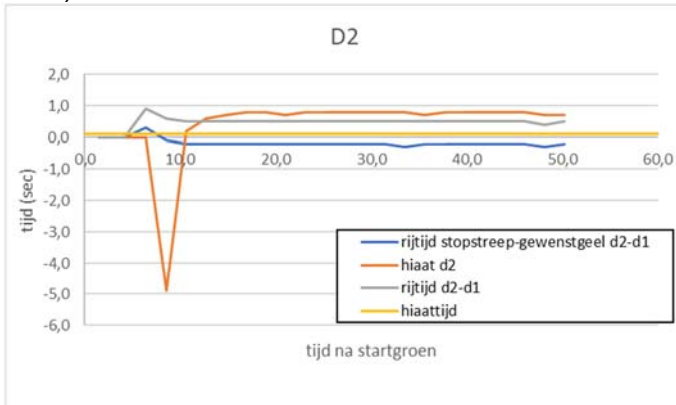
In deze bijlage zijn de grafieken opgenomen op basis waarvan de instelling van de tijdselementen van de detectielussen is bepaald.

Per snelheidsregime (40, 50, 60, 70 en 80 km/h) zijn de grafieken van de tweede tot de laatste lus opgenomen. De grafiek van de koplus is niet relevant, omdat deze lus geen rijtijd tot de stopstreep of benedenstroomse lussen heeft.

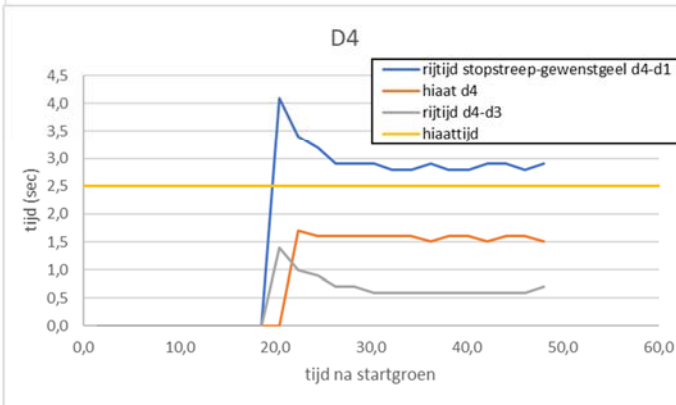
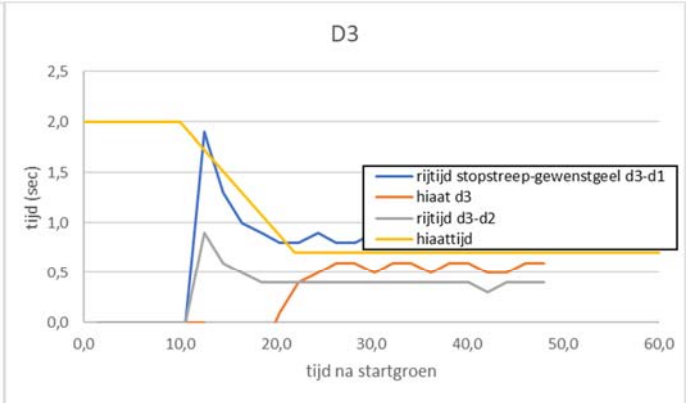
Voor de tweede detectielus tot en met de laatste lus zijn telkens vier lijnen opgenomen:

- **Rijtijd tot stopstreep - gewenst geel** (blauwe lijn): de rijtijd tot de stopstreep min de gewenste benutte geeltijd geeft de grens aan van de hiaattijd voor het laatste voertuig in de rij. De te kiezen hiaattijd moet op of onder dit punt zitten, maar niet boven de lijn. Als de rijtijd tot de stopstreep min de benutte geeltijd korter is dan de hiaattijd op een detectielus (oranje lijn) dan moet de lus uitgeschakeld worden.
- **Hiaattijd tussen voertuigen** (oranje lijn): de lijn van de hiaattijd tussen voertuigen geeft aan hoe lang de lus onbezet is tussen twee voertuigpassages (afvallen tot weer opkomen van de lus). De instelling van de hiaattijd mag niet groter zijn dan de gewenste grenshiaat. Als er slechts één verlenglus is, dan moet de hiaattijd ingesteld worden op de waarde van deze lijn. Bij meerdere verlenglussen speelt de interactie tussen de lussen een belangrijke rol.
- **Rijtijd tot volgende lus** (grijze lijn): de rijtijd tot de volgende lus is van belang binnen het verlengproces, zodat de verlengprocedure overgenomen kan worden door een benedenstroomse lus. De ingestelde hiaattijd moet groter zijn dan de rijtijd tot de volgende verlenglus.
- **Ingestelde hiaattijd** (gele lijn): de uiteindelijk gekozen hiaattijd op basis van de hiervoor genoemde criteria.

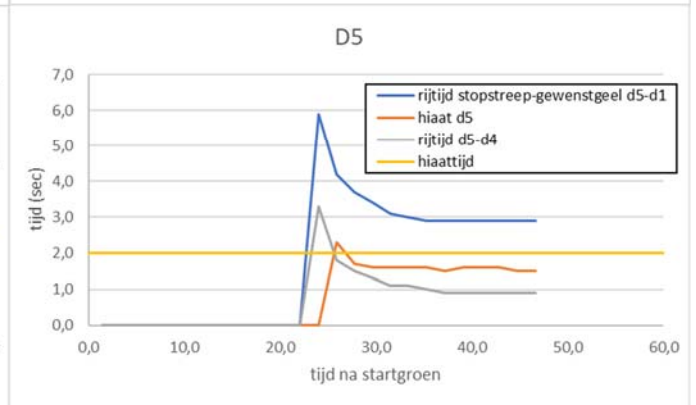
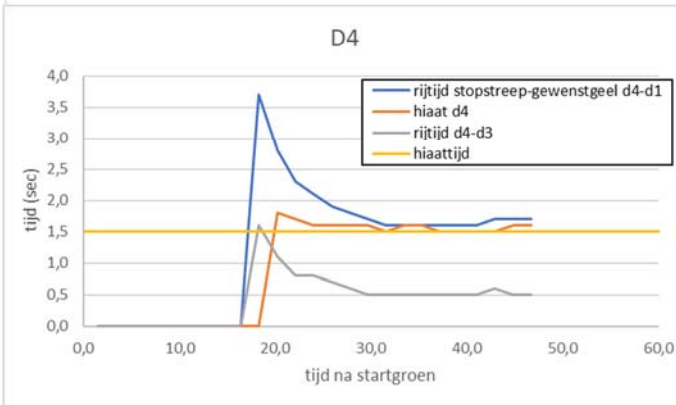
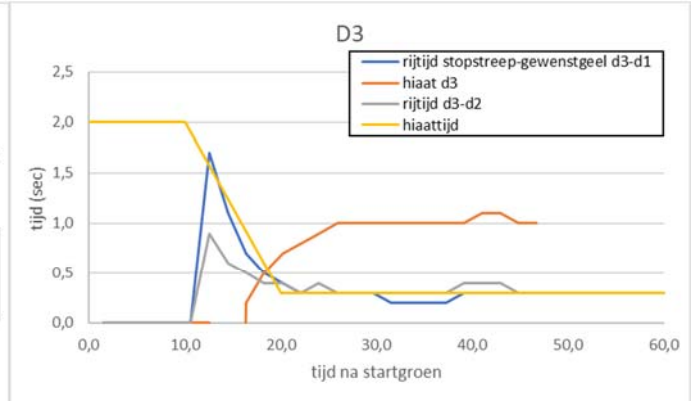
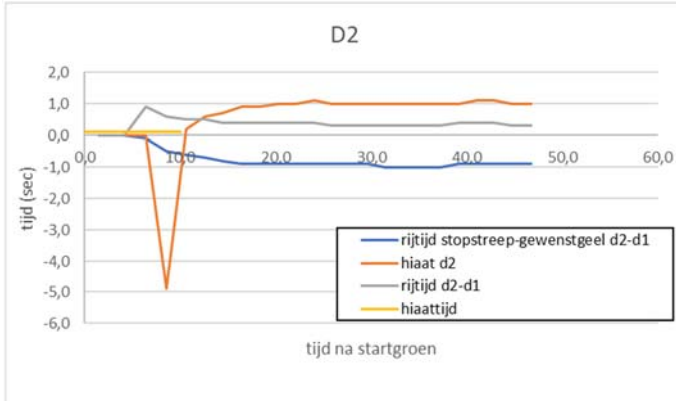
40 km/h



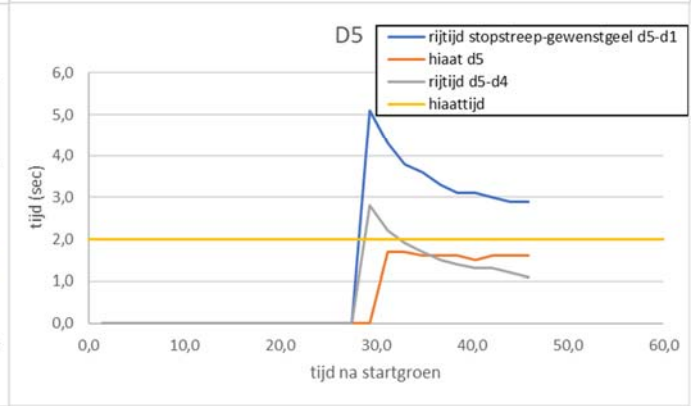
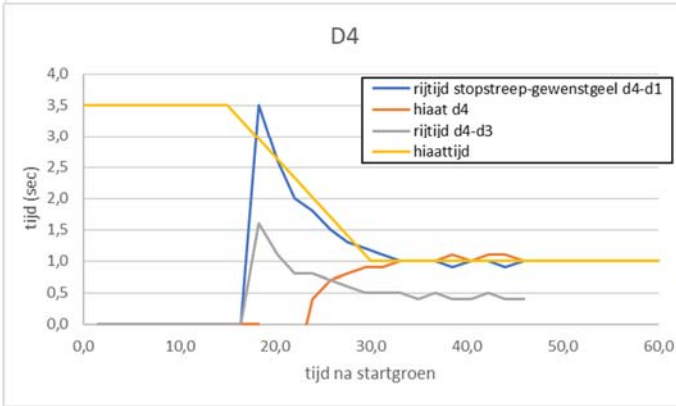
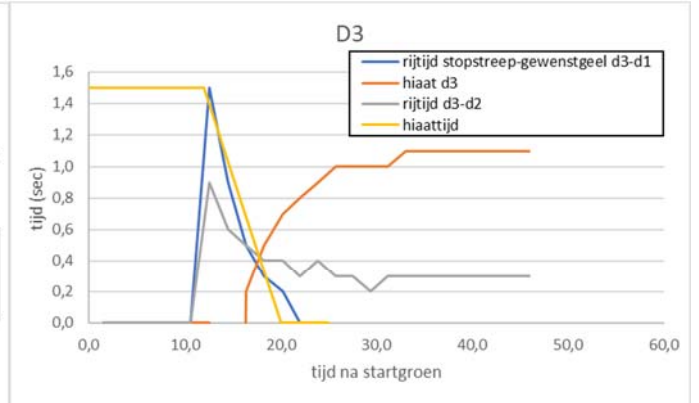
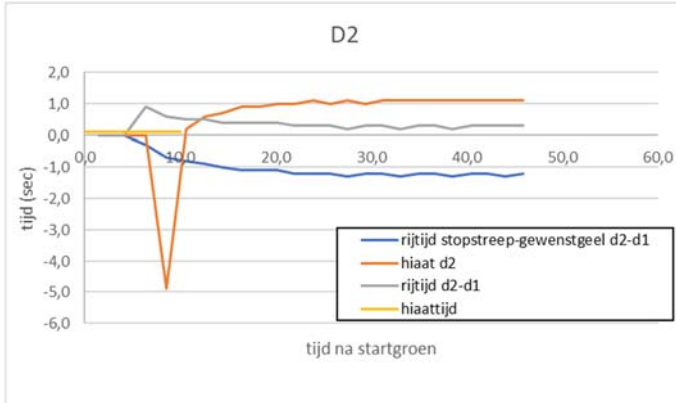
50 km/h



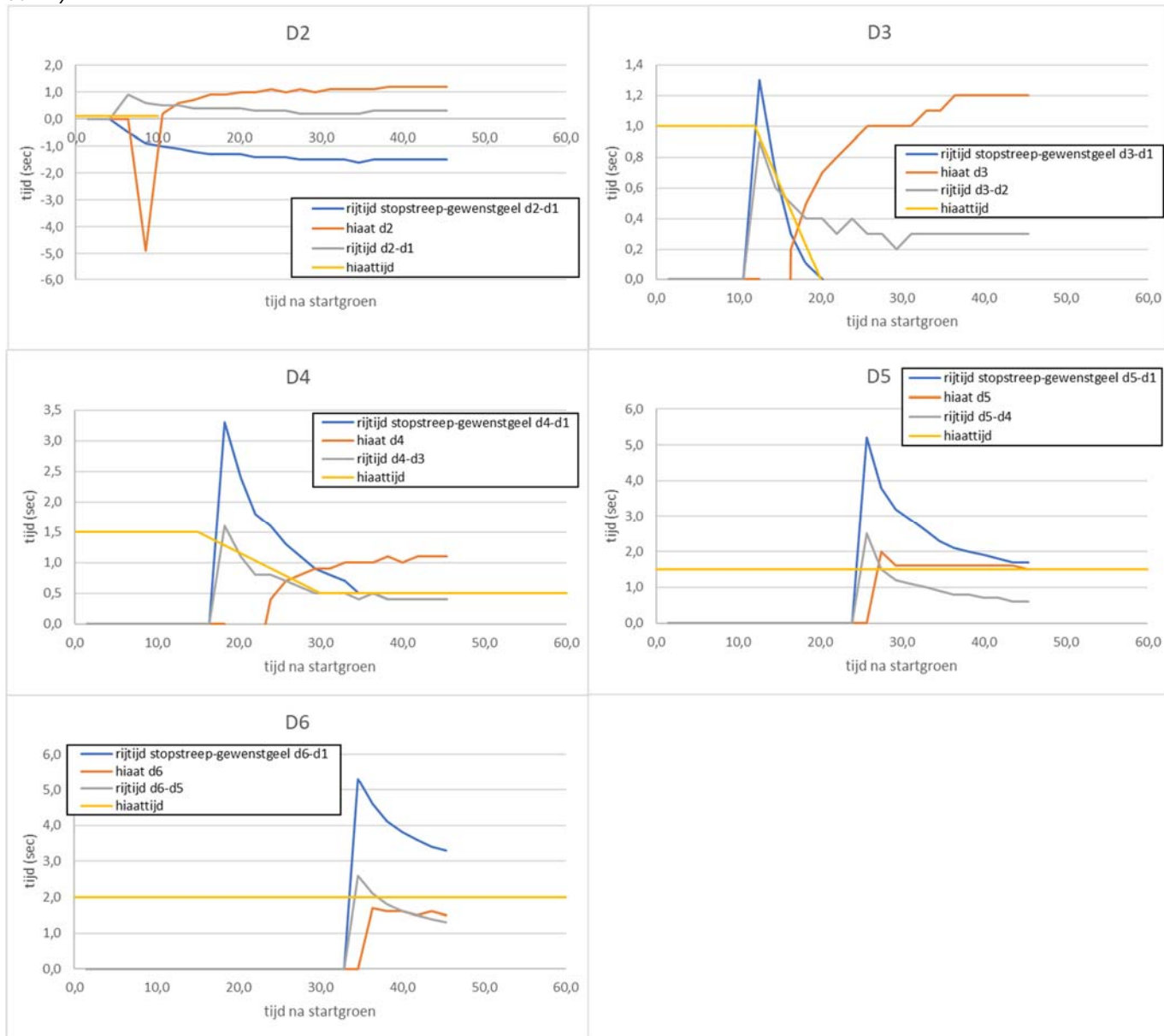
60 km/h



70 km/h



80 km/h

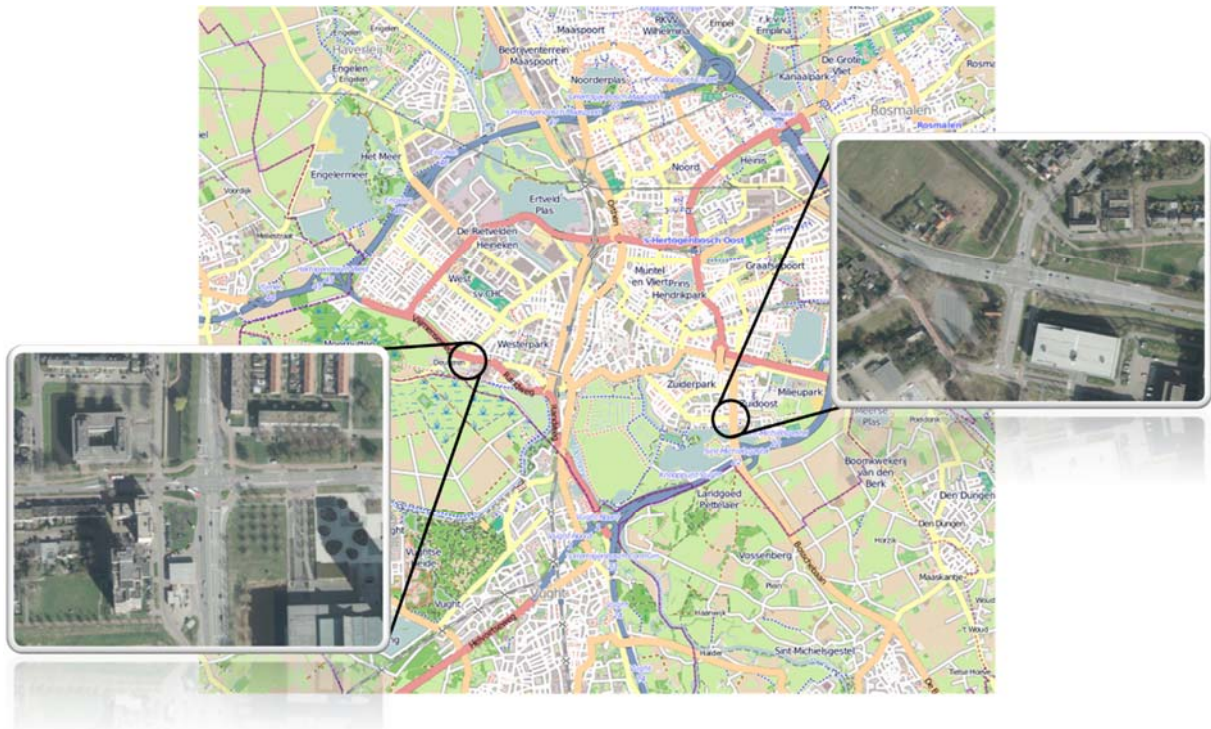


Bijlage 3

Onderzoekslocaties

Kruispunten 's-Hertogenbosch

- Randweg - Vlijmenseweg - Deutersestraat.
- Gestelseweg - Brabantlaan - Pettelaarseweg.



Kruispunten provincie Utrecht

- N224 - N227 (Woudenberg).
- N199 - Maatweg (Amersfoort).



Vestiging Deventer
Snipperlingsdijk 4
7417 BJ Deventer
T +31 (0570) 666 222
F +31 (0570) 666 888
Postbus 161
7400 AD Deventer

www.goudappel.nl
goudappel@goudappel.nl



adviseurs
mobiliteit
**Goudappel
Coffeng**