

# Impact van de ontwikkeling van de zelfrijdende auto op de infrastructuur in Enschede

Martijn Kuiper, BSc

7 juli 2018

## **Bacheloropdrachtcommissie**

A. Boelhouver

K. van der Neut, verkeerskundige

ing. G. Snellink

Bacheloropdracht Civiele Techniek

Universiteit Twente

In opdracht van Gemeente Enschede

Deze pagina is bewust leeg gelaten.

## Samenvatting

De ontwikkeling van de zelfrijdende auto (ZRA) doet afvragen wat de toekomstige rol van de ZRA in de stad zal gaan worden, en wat de consequenties zijn voor de infrastructuur in de stad. Of er consequenties zijn en wat deze inhouden is tot nog toe grotendeels onbekend. De gemeente Enschede mist de kennis om te kunnen anticiperen op de ontwikkeling van de ZRA. Het doel van het onderzoek is zichtbaar maken aan de gemeente Enschede wat de mogelijke consequenties van de ontwikkeling van de ZRA zijn voor de infrastructuur in Enschede. Hiervoor is de volgende onderzoeksvraag opgesteld: *Wat is de impact van de ontwikkeling van de ZRA op de infrastructuur in de gemeente Enschede?* Om op deze vraag een antwoord te kunnen geven is een scenario onderzoek uitgevoerd en zijn *no regret* maatregelen opgesteld. Uit het scenario onderzoek is gebleken dat de ontwikkeling van de ZRA heel grote onzekerheden kent. Ook is gebleken dat een ZRA, om te kunnen functioneren in de stad, in staat moet zijn tot V2I en V2V communicatie en dat dus vanuit de infrastructuur V2I communicatie gefaciliteerd moet worden. Op basis van de resultaten uit het scenario onderzoek, literatuuronderzoek en interviews zijn *no regret* maatregelen opgesteld, die de gemeente Enschede nu al in acht kan nemen om te kunnen anticiperen op toekomstig zelfrijdend verkeer. Het implementeren van V2I communicatie in de stad kan nu al voordelen opleveren voor de gemeente en is een grote stap richting het mogelijk maken van zelfrijdend vervoer in de stad.

# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>5</b>
1.1	Probleemstelling . . . . .	5
1.2	Relevantie . . . . .	6
1.3	Doel . . . . .	6
1.4	Onderzoeksvragen . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Achtergrondkennis</b>	<b>7</b>
2.1	Context . . . . .	7
2.2	De zelfrijdende auto . . . . .	7
2.3	Eigendomsstructuur . . . . .	8
2.4	Interactie ZRA en overig verkeer . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Onderzoeksmethode</b>	<b>10</b>
3.1	Scenario onderzoek . . . . .	10
3.2	Literatuuronderzoek . . . . .	12
3.3	Interview . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Resultaten</b>	<b>14</b>
4.1	Factoren bepalend voor de infrastructuur . . . . .	14
4.1.1	De ZRA . . . . .	14
4.1.2	Eigendomsstructuur . . . . .	14
4.1.3	Interactie ZRA en overig verkeer . . . . .	15
4.1.4	Penetratiegraden ZRA . . . . .	15
4.1.5	Benodigde wegcapaciteit . . . . .	16
4.2	Scenario's . . . . .	16
4.2.1	Geen ZRA . . . . .	16
4.2.2	ZRA in ontwikkeling . . . . .	17
4.2.3	ZRA in gebruik . . . . .	18
4.2.4	ZRA onmisbaar . . . . .	19
4.3	No Regret maatregelen . . . . .	20
4.3.1	Digitale infrastructuur . . . . .	20
4.3.2	Fysieke infrastructuur . . . . .	21
4.3.3	Overig . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Conclusie</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>Discussie</b>	<b>24</b>
	<b>Bijlagen</b>	<b>27</b>
<b>A</b>	<b>Interview 1</b>	<b>28</b>
<b>B</b>	<b>Interview 2</b>	<b>35</b>
<b>C</b>	<b>Interview 2</b>	<b>42</b>
<b>D</b>	<b>Interview 4</b>	<b>49</b>
<b>E</b>	<b>Interview 5</b>	<b>55</b>
<b>F</b>	<b>Interviewvragen</b>	<b>59</b>

# 1 Inleiding

Het ontwikkelen en produceren van nieuwe technologieën brengt grote veranderingen in hoe mensen zich gedragen, hoe mensen met elkaar communiceren, en hoe men zich het best van A naar B weet te begeven. Sinds de uitvinding van de eerste auto in 1885 zijn mensen in staat om zelf grotere afstanden in een kortere tijd af te leggen. De ontwikkeling van de auto zoals wij die nu kennen, heeft een enorme impact gehad op de manier waarop de mens leeft en op de manier waarop overheden en beleidsmakers hun omgeving vormgeven.

Een ontwikkeling die in de nabije toekomst wellicht veel verandering teweeg zal brengen is die van de zelfrijdende auto (ZRA). Iemand die al vroeg een succesvolle poging heeft gedaan tot het gedeeltelijk zelfrijdend maken van een auto is Ralph Teetor (Pune, 2016). In 1945 ontwikkelde hij de cruise control; zijn reden om dit te ontwikkelen was simpelweg het verhogen van de comfort tijdens het reizen. Tegenwoordig, in 2018, is de technologie zover ontwikkeld dat bijna elke handeling nodig voor het besturen van een auto gedaan kan worden door de auto zelf. Er zijn veel redenen voor het feit dat die technieken nog niet volledig gebruikt worden in auto's. Zo zijn in zware weersomstandigheden de technieken nog erg beperkt. Ook kan een ZRA zich op onverharde wegen moeilijk voortbewegen. Autofabrikant Tesla produceert auto's met een semi-autonome *autopilot* functie (Burns, 2016) die in staat is om hands-free te rijden op snelwegen. Dit komt nog niet in de buurt van een volledig zelfrijdende auto, maar het veranderd toch veel geldende principes in het verkeer.

Hoe de toekomstige ontwikkeling en de implementatie van de ZRA in het verkeer plaats zullen vinden is erg onzeker. Dát de ZRA er zal komen, daar zijn velen sterk van overtuigd. Een aantal voorspellingen zijn als volgt: Volgens een onderzoek uitgevoerd door Victoria Transport Policy Institute zullen in 2050 betaalbare ZRA's verkocht worden (Litman, 2014). Ook wordt voorspeld dat in 2080 de meerderheid van de auto's zelfrijdend is. In een onderzoek uitgevoerd door Milakis et al. (2017) worden vier realistische scenario's opgesteld voor de ontwikkeling van de ZRA. De laagste uitkomst van een van de scenario's voorspelt dat in 2050 slechts 3 procent van de auto's zelfrijdend zal zijn. In een ander scenario is 61 procent van de auto's in 2050 zelfrijdend.

De ZRA komt er dus aan; wanneer en hoe, dat is de vraag. De ZRA heeft de potentie om steden te veranderen en om een duurzame oplossing te bieden betreft mobiliteit in een stad. Dit feit maakt het interessant om te kijken wat de toekomstige ontwikkeling van de ZRA nú betekent voor de stad. Dit onderzoek tracht hier een antwoord op te vinden.

## 1.1 Probleemstelling

De afdeling Mobiliteit van de gemeente Enschede is bezig met het schrijven van een mobiliteitsvisie. Deze visie vormt een basis voor het beleid dat de gemeente de komende jaren gaat voeren betreft de infrastructuur in de gemeente. Hoewel het streven is om infrastructurele projecten te ontwerpen voor ten minste 50 jaar, blijkt dit tijdspanne in de praktijk vaak minder te zijn. Desondanks is het van belang om goed na te denken over het toekomstbestendig maken van de infrastructuur. Met het opkomen van de ZRA ontstaat er een nieuwe uitdaging voor de gemeente Enschede. Als wegbeheerder is de gemeente benieuwd of de ontwikkeling van de ZRA consequenties heeft voor de infrastructuur, wat deze consequenties zijn en wanneer hier rekening mee gehouden moet worden. Of er consequenties zijn en wat deze inhouden is tot nog toe onbeantwoord. De gemeente mist dus de kennis om te kunnen anticiperen op de ontwikkeling van de ZRA.

## 1.2 Relevantie

Het onderzoeken van de implicaties van de ZRA op de infrastructuur is niet uniek. In een onderzoek uitgevoerd door het Kennisinstituut voor Mobiliteit (KIM) wordt op verschillende vlakken geanalyseerd wat de gevolgen zijn voor toekomstige verkeer- en vervoerssystemen, binnen en buiten stedelijk gebied (Taede Tillema e.a., 2017). In een onderzoek uitgevoerd door TNO en Royal HaskoningDHV wordt aan de hand van de technische aspecten van de ZRA het toekomstig wegontwerp op stroomwegen en toegangswegen bepaald (Morsink e.a., 2016). De uitkomsten van deze onderzoeken kunnen al zeker nuttig zijn voor de gemeente Enschede. Toch is er meer onderzoek nodig. De kennis betreft implicaties op de infrastructuur in de stad is veel kleiner in vergelijking met de kennis over implicaties die de ZRA heeft op stroomwegen. Ook is er over implicaties op de fysieke infrastructuur weinig bekend (Farah, 2016). De complexiteit van het onderwerp en de snelle vooruitgang die geboekt wordt in het onderzoeksgebied maken onderzoek hierin lastig. Het vertalen van bestaande onderzoeksresultaten naar tastbare maatregelen is een uitdaging. Elk onderzoek heeft zijn eigen kader en context. Het verzamelen van verschillende resultaten, aangevuld met kennis van experts, in een praktisch en bruikbaar format, waarin verschillende mogelijke scenario's worden getoond is een goede start voor de gemeente Enschede.

## 1.3 Doel

Het doel van het onderzoek is zichtbaar maken aan de gemeente Enschede wat de mogelijke consequenties van de ontwikkeling van de ZRA zijn voor de infrastructuur in Enschede. Om dit doel te behalen wordt getracht realistische voorspellingen te geven over hoe de infrastructuur er over 25 jaar in Enschede uit gaat zien. Daarnaast moet het onderzoek resulteren in een set maatregelen die de gemeente Enschede direct in acht kan nemen om te kunnen anticiperen op toekomstig zelfrijdend verkeer.

## 1.4 Onderzoeksvragen

De probleemstelling en het doel leiden beide naar de onderzoeksvraag en de deelvragen die beantwoord dienen te worden in het onderzoek. De onderzoeksvraag luidt als volgt:

*Wat is de impact van de ontwikkeling van de zelfrijdende auto op de infrastructuur in de gemeente Enschede?*

Om een gefundeerd en omvattend antwoord te kunnen geven op deze onderzoeksvraag zijn verschillende deelvragen opgesteld. Deze vragen worden in dezelfde volgorde behandeld zoals ze hier weergegeven zijn. Na elke deelvraag volgt een toelichting op de vraag.

1. *Welke factoren bepalen wat gevraagd wordt van de omliggende infrastructuur van ZRA's in een stedelijke omgeving?*

Voordat bepaald kan worden hoe de infrastructuur zou kunnen veranderen in de toekomst is het van belang te weten welke factoren (bijvoorbeeld de techniek in en rondom de ZRA, interactie met overige weggebruikers en de verwachte vraag naar zelfrijdend vervoer) de infrastructuur beïnvloeden. Met deze kennis kunnen volgende deelvragen beantwoord worden. Deze factoren worden gebruikt om de scenario's samen te stellen.

2. *Wat zijn realistische en mogelijke scenario's van implementatie van de ZRA in de gemeente Enschede over 25 jaar?*

De onzekerheid verbonden aan de ontwikkeling van de ZRA geeft dat verschillende scenario's gemaakt moeten worden voor over 25 jaar. De implementatie van de ZRA zal de infrastructuur direct en indirect beïnvloeden; het weglaten van mogelijke scenario's zou tot misplaatste conclusies kunnen leiden. Gezien de tijdspanne van het onderzoek

moeten er grenzen gesteld worden aan het aantal uitgewerkte scenario's, om te breed en gedetailleerd onderzoek te voorkomen.

3. *Wat zijn de consequenties voor zowel de digitale als de fysieke infrastructuur in de beschreven scenario's?*

Nadat de factoren en de scenario's bepaald zijn, kan per scenario bepaald worden wat de consequenties zijn voor de infrastructuur. Met deze deelvraag worden de scenario's verder uitgewerkt en wordt de focus verlegd van de ZRA naar de infrastructuur.

4. *Welke maatregelen moeten op korte termijn door de gemeente Enschede genomen worden om te kunnen anticiperen op toekomstig zelfrijdend verkeer?*

Voor de gemeente Enschede kan het nuttig blijken om te weten wat de maatregelen zijn die op korte termijn al genomen kunnen of moeten worden om te anticiperen op de implementatie van de ZRA in het straatbeeld. Deze maatregelen zijn *no regret* maatregelen die ongeacht de ontwikkeling van de ZRA, voordeel opleveren voor de gemeente Enschede.

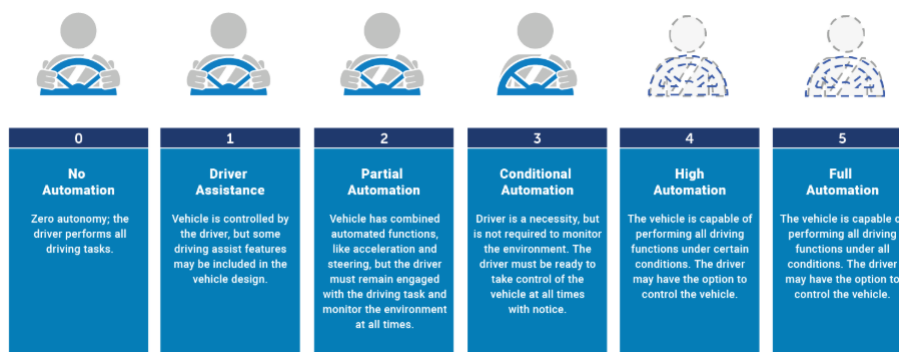
## 2 Achtergrondkennis

### 2.1 Context

De eerste poging tot het zelfrijdend maken van een auto dateert terug naar 1921 (Maurer e.a., 2016). De massa motorisering in de Verenigde Staten was net op gang gekomen en deze ontwikkeling kostte veel mensen het leven; bestuurdersfouten waren de grootste oorzaak van de ongevallen. Hieruit kwam het idee voort om een auto te ontwerpen die niet werd bestuurd door een mens (Maurer e.a., 2016). Theoretisch gezien was de ontworpen auto niet zelfrijdend, hij werd op afstand bestuurd. Toch is het interessant om te zien dat vanaf het begin van de grote ontwikkeling van de auto de gedachte is ontstaan om de auto zelfrijdend te maken. En bij de poging in 1921 is het niet gebleven. Een andere poging werd gedaan in 1956, met behulp van een film van Walt Disney (Maurer e.a., 2016). In die tijd bestond een groot deel van de tijdsbesteding van de gemiddelde Amerikaan uit reizen van en naar werk. Vaders hadden geen tijd meer voor vrouw en kinderen en sociale contacten vervielen. De *Magic Highway U.S.A.* werd door Ward Kimball aangedragen als een oplossing voor dit probleem. In de film is onder andere te zien hoe een familie in een zelfrijdende auto reist, waarbij de sociale interactie tussen de gezinsleden erg belangrijk wordt geacht. De zelfrijdende auto is hier de oplossing voor alle ongevallen, files, en dus ook familieproblemen (Maurer e.a., 2016). Door de geschiedenis heen zijn nog veel vaker ideeën bedacht en uitgewerkt, en hierbij zijn meerdere redenen naar voren gekomen om een ZRA te ontwikkelen. Toch is veiligheid altijd een van de belangrijkste motiveringen gebleken. Ideeën over het drastisch transformeren van de manier waarop de mens zich vervoert, zijn dus ook niet van de laatste jaren. Tot nog toe heeft dit weinig teweeg gebracht. De vraag is, nu de technologie een stuk verder ontwikkeld is, wat de mogelijkheden zijn.

### 2.2 De zelfrijdende auto

De zelfrijdende auto (ZRA) is een auto die in staat is om (gedeeltelijk) zonder hulp van een menselijke bestuurder te rijden. Om dit te kunnen verzamelt de ZRA informatie uit zijn omgeving en baseert op de waarnemingen welke snelheid en richting aangenomen wordt. Voor het beschrijven van de werking van de ZRA zijn twee grote principes te definiëren: automatisatie en connectiviteit. Automatisatie is de mate waarin auto's in staat zijn om zonder input van de bestuurder te kunnen rijden. Connectiviteit is de mate waarin auto's in staat zijn om te kunnen communiceren met andere auto's, de infrastructuur of andere systemen. Voor de definitie worden beide principes apart beschreven; in werkelijkheid kan het zijn dat beide principes een



Figuur 1: SAE: 6 automatisatie levels (International, 2016)

ZRA vormgeven.

Een **geautomatiseerde** auto is een auto waarvan verscheidene, of alle aspecten van de laterale functies (sturen) en de longitudinale functies (gas geven en remmen) van een auto plaatsvinden zonder directe input van de bestuurder. Een geautomatiseerde auto verkrijgt informatie om deze keuzes te maken van de apparatuur aanwezig in het voertuig en de fysieke omliggende infrastructuur (Somers en Weeratunga, 2015). Veelgebruikte technieken om de omgeving waar te nemen zijn LIDAR (laser scan), long- en shortrange radars, camera's en ultrasound (Isaac, 2015). Een veelgebruikte manier om de mate van automatisatie van een geautomatiseerde auto uit te drukken is de categorisatie van *the Society of Automotive Engineers* (SAE) (Figuur 1). De twee extremen zijn level 0 en level 5. In een level 0 auto moet de bestuurder alle rijtaken uitvoeren. Een level 5 auto is in staat om zelf alle rijtaken uit te voeren. De personen in de auto hoeven in geen enkele situatie zelf betrokken te raken bij het rijden. Levels 2 tot en met 4 graderen tussen deze levels.

Een **connectieve** auto is een auto die in staat is om te communiceren met andere auto's (V2V), de infrastructuur (V2I) of met andere systemen, bijvoorbeeld een mobiele telefoon gedragen door een voetganger (V2X) (Weeratunga en Somers, 2015). Voor V2V en V2I communicatie worden *Cooperative Intelligent Transport Systems* (C-ITS) technieken gebruikt. C-ITS is in staat om, met behulp van draadloze communicatie, *real-time* informatie te ontvangen over de situatie in de omgeving van de auto. Deze informatie komt dus van andere connectieve auto's of vanuit de infrastructuur. Dit kan informatie zijn over de snelheden van omringende auto's, potentiële incidenten, gevaren en bedreigingen. De hoeveelheid informatie die hierbij binnenkomt, komt uit een omgeving en kent een tijdschors horizon die beiden groter zijn dan wat een menselijke bestuurder of LIDAR systeem kan binnenhalen aan nuttige informatie (Weeratunga en Somers, 2015).

In dit verslag zal gesproken worden van de ZRA (zelfrijdende auto). De ZRA kent een mate van automatisatie en heeft C-ITS aan boord, en is daardoor in staat tot V2I en V2V communicatie. Per situatie zal, indien nodig, de mate van automatisatie toegelicht worden.

## 2.3 Eigendomsstructuur

Een term die vaak in verband gebracht wordt met de ontwikkeling van de ZRA is *car sharing*. In beginsel is *car sharing* een service waarbij huurauto's worden aangeboden als alternatief voor de private auto. De auto is dus niet langer bezit van de gebruiker maar van een organisatie. De hoeveelheid geld die betaald moet worden door de gebruiker is hierbij volledig afhankelijk van hoe veel de gebruiker de auto benut (Rens, 1998). Dit is een andere vorm van eigendomsstructuur dan wat nu voornamelijk gebruikelijk is in Nederland; er zijn meer dan 8



miljoen auto's in Nederland. Veel mensen die gebruik maken van vervoer met een auto hebben daar ook een auto voor in bezit, het is hun persoonlijk eigendom. De ontwikkeling van het bezitten van een auto naar het delen van auto's een ontwikkeling die in principe losstaat van de ZRA. Al in 1999 worden door Prettenhaler en Steiniger (1999) de potenties van *car sharing* geanalyseerd. De reden hiervoor is niet de toekomstige ontwikkeling van de ZRA, maar het streven naar duurzaamheid. In 2017 waren er 30.697 deelauto's in Nederland. Dit waren er al ruim 5700 meer dan in 2016. Er zijn verschillende concepten denkbaar wat betreft het eigendom en het gebruik van de auto. *Mobility as a Service* (MaaS) is een concept volop in ontwikkeling in Nederland. "*Mobility as a Service (MaaS) staat voor een transitie in mobiliteit, waarbij de consument toegang heeft tot mobiliteit in de vorm van diensten, in plaats van te investeren in het bezit van transportmiddelen of losse diensten als OV en daarmee dus flexibeler is en meer kan worden ontzorgd.*" (Connekt, 2017). In dit concept is het bezitten van een auto dus niet noodzakelijk om verzekerd te zijn van een comfortabele reis van A naar B. Toch hangt de ontwikkeling van dit soort concepten wel degelijk samen met de mogelijkheden die de ZRA heeft te bieden. In een onderzoek uitgevoerd door Gasser (2016), wordt gekeken naar de gevolgen die de ZRA gaat hebben op de vervoerskeuze van consumenten. Hieruit blijkt dat de potentie van concepten als *Car sharing* of *Vehicle on Demand* sterk vergroot wordt wanneer voertuigen zonder bestuurder zich kunnen begeven in het verkeer. De vraag binnen de context van dit onderzoek is in hoeverre de concepten gecombineerd impact zullen hebben op de infrastructuur.

## 2.4 Interactie ZRA en overig verkeer

Veel beslissingen in het verkeer, gemaakt tussen automobilisten en kwetsbare weggebruikers, worden gemaakt op basis van communicatie tussen deze twee groepen. Deze communicatie wordt niet door techniek in de auto of in de infrastructuur overgebracht, maar door een wijde verscheidenheid aan bepaalde blikken, handelingen en volgorde van handelingen (Färber, 2016). Zo kan een voetganger bij het oversteken zich er van verzekeren gezien te zijn door een tegemoedkomende auto door het maken van kort oogcontact. Of, een fietser weet dat hij voorrang krijgt van een automobilist door een kort handgebaar van de autobestuurder. In elke omgeving en cultuur kunnen deze handelingen, en hoe die geïnterpreteerd moeten worden verschillen. Universele regels opstellen voor de ZRA is dus onmogelijk. Testen laten zien dat de onmogelijkheid om te kunnen communiceren met de ZRA, en het niet weten waar de ZRA zich naartoe beweegt, nadelen met zich meebrengt voor de verkeerssituatie en de kwetsbare weggebruiker (Merat e.a., 2018). Wandelaars die door afwezigheid van belijning niet weten waar een ZRA zich heen beweegt, zijn geneigd voorrang te nemen. Ook wordt een gevoel van onveiligheid geconstateerd. De vraag is in hoeverre de infrastructuur aan deze uitdaging omtrent de ZRA kan bijdragen.

### 3 Onderzoeksmethode

#### 3.1 Scenario onderzoek

Een groot gedeelte van de te verkrijgen resultaten komen voort uit scenario onderzoek; deelvraag 1, 2 en 3 worden binnen het scenario onderzoek beantwoord. Er zijn verscheidene redenen om scenario's op te stellen. Het opstellen van scenario's kan dienen om kennis over een toekomstige situatie te verkrijgen. Daarmee wordt ook gelijk duidelijk wat de limieten zijn aan die kennis. Ook kan het helpen in het stellen van doelen bij het vormen van beleid (Hannah en Gabner, 2008). De grote onzekerheid in de ontwikkeling van de ZRA maakt dat scenario's ontwikkelen een geschikte methode is voor dit onderzoek. In overleg met de begeleider van de gemeente Enschede is besloten dat de tijdshorizon voor de scenario's op +/- 25 jaar wordt gesteld. In principe wordt infrastructuur ontwikkeld voor 50 jaar. In werkelijkheid is dit niet vaak het geval, wetgeving kan veranderen in 50 jaar en andere eisen aan de weg stellen. Andere ontwikkelingen, zoals die van de auto, kunnen ook invloed hebben op de infrastructuur; 25 jaar is hierom een realistische waarde.

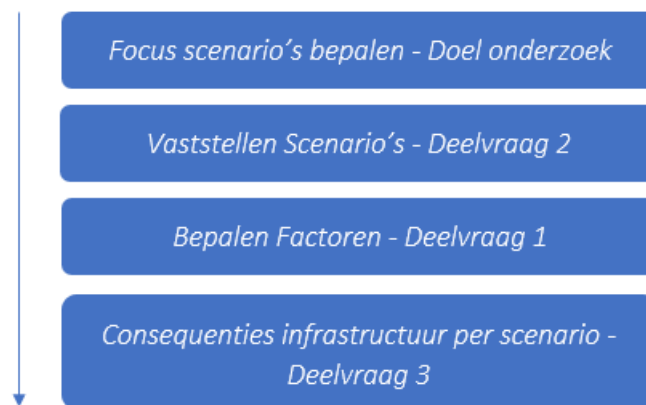
Voor het bepalen van een geschikte scenario methode is gekeken naar vergelijkbare onderzoeken. In een onderzoek uitgevoerd door Milakis et al. (2017), is met behulp van de *intuitive logics* methode de toekomstige ontwikkeling van de ZRA in kaart gebracht, voor de jaren 2030 en 2050. Ook in een onderzoek uitgevoerd door Ross en Guhathakurta (2017) wordt hiervan gebruik gemaakt. Hier wordt de impact van de ZRA op het energiegebruik onderzocht. De *intuitive logics* methode maakt het mogelijk om veel informatie over toekomstige situaties in kaart te brengen aan de hand van bepaalde key factors, die de ontwikkeling van het fenomeen bepalen. Ook wordt hiermee zichtbaar gemaakt welke stappen genomen moeten worden om tot die ontwikkelingen te komen (Hannah en Gabner, 2008). De key factors bepalen hoe de scenario's er uit komen te zien. Verschillende elementen rondom de ZRA zullen uiteindelijk bepalen wat er van de infrastructuur gevraagd wordt. Al met al maakt dit deze methode uitermate geschikt voor het onderzoek. Wegens een kort tijdsbestek en beperkte middelen worden gedeeltes van de *intuitive logics* methode gebruikt voor het onderzoek. Alle stappen van de *intuitive logics* methode worden toegelicht; per stap zal worden besproken hoe, en of dit geïmplementeerd wordt in het onderzoek en welk deel van het onderzoek er bij betrokken is.

Geen ZRA	ZRA in ontwikkeling	ZRA in gebruik	ZRA onmisbaar
Een infrastructuur in de gemeente Enschede waar de ZRA niet aan deelneemt. Met name ter vergelijking.	Een infrastructuur in Enschede vormgegeven door pessimistische verwachtingen vanuit literatuur en experts.	Een infrastructuur in Enschede vormgegeven door optimistische verwachtingen vanuit literatuur en experts.	Een infrastructuur in Enschede waarin veel van de toekomstige verwachtingen omtrent de ZRA in verwerkt zijn. Met name om aan te geven waar de ontwikkeling naar toe gaat.

Lage verwachtingen Hoge verwachtingen

Figuur 2: Scenario's infrastructuur Enschede over 25 jaar.

Stap 1 in de *intuitive logics* methode is het vaststellen van de focus van het scenario proces. Dit valt samen met het doel van het onderzoek; namelijk zichtbaar maken aan de gemeente Enschede wat de mogelijke consequenties van de ontwikkeling van de ZRA kunnen betekenen voor de infrastructuur in Enschede. Stap 2 is het identificeren van key factors. Dit wordt gedaan in deelvraag 1; hier worden de factoren die bepalen wat er gevraagd wordt van de infrastructuur rondom de ZRA opgesteld. Hierbij wordt aangetoond dat deze bepalende factoren de infrastructuur beïnvloeden. Stap 3 is het evalueren van de key factors; de onvoorspelbaarheid en de impact van de key factors worden geanalyseerd. In dit onderzoek wordt van de key factors



Figuur 3: Overzicht scenario methode.

beschreven wat ze zijn en waarom ze de infrastructuur beïnvloeden (deelvraag 1). Vervolgens wordt per scenario de impact van de key factors op de infrastructuur beschreven (deelvraag 3). Stap 4 van de *intuitive logics* methode is het opstellen van scenario's. Hoe de key factors zich ontwikkeld hebben in deze scenario's wordt bepaald aan de hand van *driving forces*, die de key factors beïnvloeden. In dit onderzoek worden geen *driving forces* bepaald, daarom worden de scenario's opgesteld op basis van verschillende verwachtingen. Bij aanvang van het onderzoek is, met behulp van gesprekken met opdrachtgevers en experts, duidelijk geworden dat de verwachtingen met betrekking tot de ontwikkeling van de ZRA, en hoe de infrastructuur in de stad zich daarbij ontwikkelt, ver uit elkaar liggen. Dit feit, de vaststelling van de tijdshorizon van 25 jaar en de beschikbare onderzoekstijd van 10 weken hebben geleid tot de vier scenario's weergegeven in Figuur 2. Deze vormen het antwoord op deelvraag 2. Scenario *ZRA onmisbaar* is hierbij niet een realistisch scenario voor over 25 jaar, maar dient een andere functie, namelijk om aan te geven waar de ontwikkeling van de ZRA uiteindelijk naar toe zou kunnen gaan en hoe dit in Enschede er uit zou kunnen zien. Vervolgens worden aan de hand van de bevonden verwachtingen uit deelvraag 1 en literatuuronderzoek en interviews (beschreven in paragraaf 3.2 en 3.3) de scenario's verhalend omschreven en vergeleken met elkaar. Eerst volgt een schets over hoe de ZRA tot dan toe mogelijk kan zijn ontwikkeld. Dit is voornamelijk om inzicht te geven in hoe het kan dat de scenario's zo ver uit elkaar liggen. Dan volgt een beschrijving van de factoren en hoe ze de infrastructuur beïnvloeden. Deze scenario's vormen een antwoord op deelvraag 3.

De infrastructuur in Enschede varieert. Functies die wegen in Enschede hebben, verschillen; dit zal meespelen in hoe de infrastructuur ontworpen is en wat de rol van de ZRA hier in is. Daarom wordt de infrastructuur in de scenario's beschreven aan de hand van drie zones zoals geclassificeerd in de mobiliteitsvisie van de gemeente Enschede (Gemeente Enschede en Goudappel Coffeng, 2018). Deze zones worden als volgt omschreven:

#### **Zone A**

Zone A omvat het (historische) centrum van de stad, maar ook het Kennispark. In deze zone staat de inrichting van de openbare ruimte voor fietsers en voetgangers centraal. Er wordt dus ingezet op maximale verblijfskwaliteit. Door doorgaand autoverkeer te weren blijven de verkeersintensiteiten laag en zijn gescheiden voorzieningen voor fietsers en verkeersregelinstantaties veelal niet nodig. Auto's zijn 'te gast'. Parkeren is duidelijk gereguleerd en waar mogelijk wordt de behoefte aan parkeren opgevangen in gebouwde voorzieningen. Intensiteiten voor het autoverkeer blijven bij voorkeur onder de 5.000 per etmaal en de snelheid lager dan 30 km/h.

### **Zone B**

Zone B wordt in grote lijnen gevormd door de wijken die voor de massamotorisatie zijn gebouwd (van vóór 1960, zie kaart hiernaast van eind jaren '50). Deze wijken zijn dus niet ingericht voor veel snelverkeer. Dit vraagt om een mobiliteitssysteem waarbij auto, fiets en OV in balans zijn. Herkenbaarheid, continuïteit, aantrekkelijkheid en herstellen van historische structuren staat bij de inrichting van de openbare ruimte centraal. Fietsers profiteren hier van mee. De hoeveelheid autoverkeer mag niet zo groot zijn dat het ten koste gaat van deze kwaliteiten en de leefbaarheid en oversteekbaarheid onder druk komt te staan. De intensiteit voor het autoverkeer blijft daarom bij voorkeur onder de 15.000 per etmaal. De toegestane snelheid is 50 km/h maar de effectieve snelheid ligt rond de 40 km/h. Verkeer van en naar dit gebied wordt via duidelijke voorkeursroutes geleid.

### **Zone C**

De overige gebieden vallen in zone C. In deze zone is meer ruimte voor gescheiden structuren voor fiets, OV en autoverkeer. Hierdoor zijn ook hogere autointensiteiten mogelijk. Binnen deze structuren zijn verblijfgebieden met lage verkeersintensiteiten en hogere verblijfskwaliteiten.

In Figuur 4 zijn de zones weergegeven. De functionaliteiten en de doelen weergegeven in de afbeelding zijn toegespitst op de auto.

In zone A is de auto dus te gast. Voor het onderzoek zal aangenomen worden dat er geen rijbaanscheiding is, dat langzaam en snel verkeer gemengd rijdt en dat er geen verkeersregelinstallaties (VRI's) zijn. In zone B zijn alle vervoerswijzen in balans met elkaar. Voor het onderzoek wordt uitgegaan van een situatie waarin snel en langzaam verkeer gescheiden rijdt, maar niet op aparte rijbanen; er zijn VRI's aanwezig. Zone C betreft gebieden met gescheiden infrastructuur; deze worden in de resultaten als dusdanig behandeld. De invulling van deze zones in de scenario's moet resulteren in een zo compleet mogelijke beschrijving van de infrastructuur. De stappen van de gehele scenario methode zijn in het kort weergegeven in Figuur 3.

## **3.2 Literatuuronderzoek**

Benodigde resultaten, compleet voor deelvraag 1 en gedeeltelijk voor deelvraag 3 en 4, worden verkregen door het uitvoeren van een literatuur onderzoek. Bestaande onderzoeken gerelateerd aan het onderwerp worden geraadpleegd om antwoord te geven op de deelvragen. Omdat het hier een onderwerp betreft waarin een snelle ontwikkeling plaatsvindt, is getracht om voornamelijk resultaten te gebruiken uit recenter onderzoek (vanaf 2015). Dit is helaas niet altijd mogelijk. Om dit gedeeltelijk op te kunnen vangen zijn ook veel resultaten uit technische rapporten en verslagen verkregen. Databases die geraadpleegd zijn voor bestaande literatuur: Scopus, Google Scholar, IEEE, CROW en Knowledgeagenda.konnect.

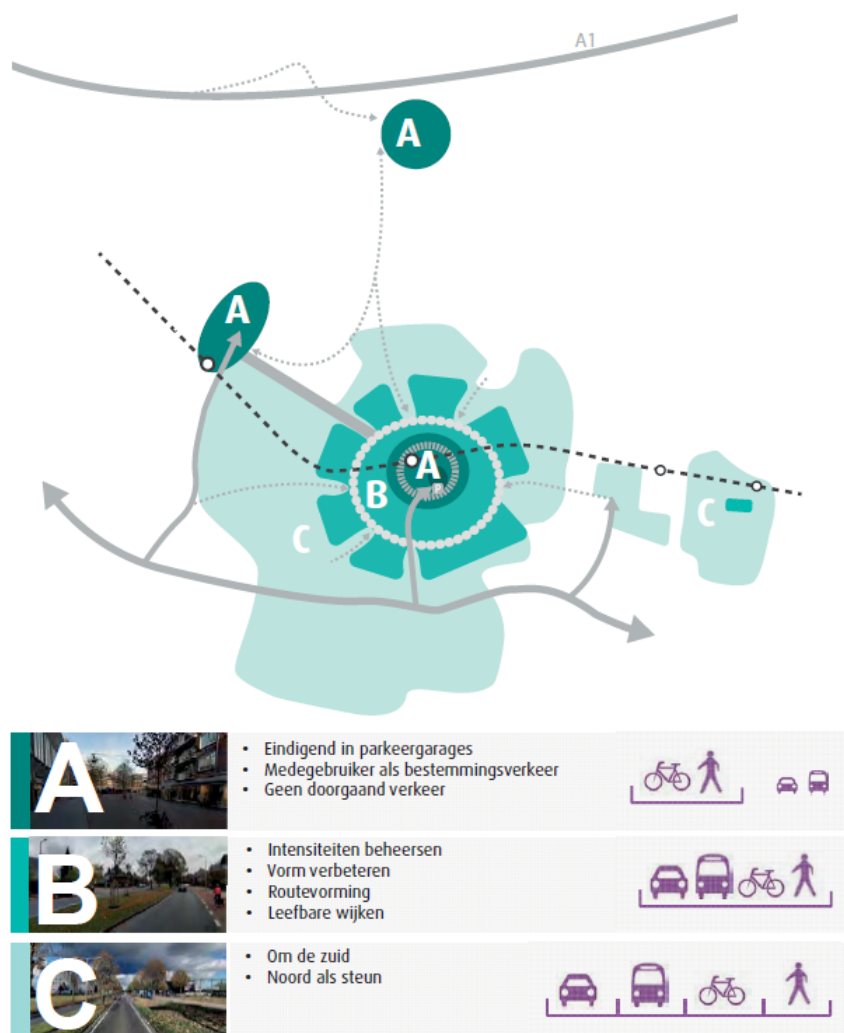
## **3.3 Interview**

De benodigde resultaten voor deelvraag 3 en 4 worden gedeeltelijk verkregen door het afnemen van interviews met experts die zich in het vakgebied rondom de ZRA begeven. Het betreft hier een kwalitatief interview waarin vooraf vragen opgesteld worden. Voorbeelden van vragen die gesteld worden, zijn:

- Is het een mogelijkheid dat zonering moet worden toegepast om het functioneren van de ZRA veilig te maken in steden?

- Verwacht u grote veranderingen in de vraag naar vervoer met een auto wanneer deze zelfrijdend kan functioneren?
- Denkt u dat het mogelijk is dat over 25 jaar auto's met SAE level 3 of 4 geproduceerd kunnen worden die zich bevinden in stedelijk verkeer? En level 5?

Een volledig overzicht van de vragen is te vinden in Bijlage F. Aan de geïnterviewden worden dezelfde vragen gesteld om achteraf de interviews met elkaar te kunnen vergelijken. Om verdieping te krijgen in het gesprek wordt doorgevraagd en van de vragenlijst afgeweken.



Figuur 4: Verschillende mobiliteitszones afkomstig uit de mobiliteitsvisie van de gemeente Enschede (Gemeente Enschede en Goudappel Coffeng, 2018).

## 4 Resultaten

De verkregen onderzoeksresultaten om deelvraag 1, 3 en 4 te beantwoorden worden nu weergegeven.

### 4.1 Factoren bepalend voor de infrastructuur

#### 4.1.1 De ZRA

In principe wordt de ZRA ontwikkeld om op de bestaande infrastructuur te kunnen functioneren. De infrastructuur kent hierin een faciliterende rol. Uit het oogpunt van veiligheid, efficiëntie en comfort is het van belang dat de ZRA zo goed mogelijk in staat is om kenmerken uit de omliggende infrastructuur en de omliggende situatie te kunnen onderscheiden. Dit zal implicaties hebben op het wegontwerp, afhankelijk van hoe de ZRA functioneert. Een voorbeeld hiervan is dat een ZRA in staat moet zijn om zijn positie te kunnen bepalen. Een combinatie aan infrastructurele faciliteiten moet waarborgen dat de auto zich op de goede positie begeeft. Voorbeelden zijn visuele markeringen, magnetische markeringen en digitaal waarneembare markeringen (Morsink e.a., 2016). De grote nauwkeurigheid van de locatiebepaling van de ZRA maakt dat rijstroken smaller kunnen zijn wanneer hier conventioneel vervoer op uitgesloten is. Hoewel dit geen vereiste is voor de ZRA om te kunnen functioneren dient dit wel het belang van de gemeente. Er ligt veel verharding in de stad, minder verharding en meer groen brengt een goede bijdrage aan het beleid dat de gemeente voert (Bijlage E). De V2I communicatie, aanwezig in de ZRA, vraagt om systemen in de infrastructuur die in staat zijn met de ZRA te communiceren. Binnen deze voorbeelden stelt de ZRA eisen aan de infrastructuur. Deze eisen zijn sterk afhankelijk van de technologische ontwikkeling van de ZRA. Een voorbeeld hiervan is dat voor een level 3 ZRA verkeersborden essentieel zijn, waar dit voor een level 5 auto niet nodig is (Farah, 2016). Per scenario kan de factor ZRA dus andere implicaties hebben op de infrastructuur.

#### 4.1.2 Eigendomsstructuur

De groeiende ontwikkeling van *car sharing*, een concept als MaaS, en hiermee dus een afname in het persoonlijk autobezit zullen gevolgen hebben voor het aantal auto's in een stad. MaaS kan een oplossing zijn voor het feit dat auto's in persoonlijk bezit 96 procent van de tijd stil staan. Een afname hierin zal gevolgen hebben op het benodigd aantal parkeerplaatsen en dus de infrastructuur. Hoe deze concepten allemaal werken, zijn niet relevant voor dit onderzoek. De gevolgen voor de infrastructuur en hoe deze concepten zich mogelijk ontwikkelen zijn dat wel. Verschillende onderzoeken laten zien wat het mogelijk effect is van een veranderde eigendomsstructuur in combinatie met de aanwezigheid van de ZRA. Een onderzoek uitgevoerd door Spieser et al. (2014) toont aan dat een derde van het aantal auto's dat nu gebruikt wordt om personen te vervoeren genoeg kan zijn om te voldoen aan mobiliteitsbehoeftes, wanneer deze volledige zelfrijdend zijn (level 5) en worden gedeeld. In een onderzoek uitgevoerd door het International Transport Forum (ITF) (2015) wordt met behulp van model analyse voor verschillende eigendomsstructuren, in combinatie met de aanwezigheid van ZRA's, bepaald wat de gevolgen zijn voor verkeer in een stedelijk omgeving. In een stad met alleen maar deelauto's, waarin meerdere personen tegelijk vervoerd kunnen worden, blijkt dat 9 van de 10 bestaande auto's verwijderd kunnen worden uit een stad. In een situatie waarin de deelauto 1 persoon vervoert, is alsnog 8 op de 10 auto's overbodig. Het aantal auto's op de weg tijdens piekuren neemt ook af. Dit is wel een situatie waarin de ZRA in staat is zonder bestuurder te rijden (Level 5). Nadelige effecten komen naar voren in een situatie waarin ook private auto's aanwezig zijn. De druk op de infrastructuur zal dan toenemen omdat tijdens piekuren, waarin zowel private als deelauto's aanwezig zijn, de hoeveelheid auto's op de weg met meer dan 30 procent kan toenemen. De parkeerbehoefte neemt in deze situatie nauwelijks af, waar dit wel een van de grote voordelen van *car sharing* zou moeten zijn. Afhankelijk van de

situatie ontstaan er dus eisen aan de infrastructuur. Wanneer de parkeerbehoefte afneemt, kan de vrijgekomen ruimte gebruikt worden voor andere doeleinden. Bij toename van het aantal auto's tijdens piekuren moet bepaald worden of de infrastructuur in staat is dit te faciliteren.

### 4.1.3 Interactie ZRA en overig verkeer

Het grote verschil tussen verkeerssituaties voorkomend op erftoegangswegen, die voornamelijk in een stedelijke omgeving binnen een bebouwde kom te vinden zijn, en verkeerssituaties op stroomwegen of ontsluitingswegen, zijn het aantal conflicten en de interactie die daarbij plaats vindt tussen de weggebruikers. In een onderzoek uitgevoerd door TNO en Royal HaskoningDHV (2016) worden de implicaties van de ZRA op het wegontwerp van stroomwegen en gebiedsontsluitingswegen, vanuit de techniek van de ZRA, geanalyseerd. Hierbij wordt geconcludeerd dat voor het bepalen van het wegontwerp van erftoegangswegen het niet voldoende is om alleen vanuit de techniek van de auto te kijken, aangezien de interactie tussen de ZRA en het langzame verkeer in een stad van groter belang is. Zo kan een versmalling van de rijbaan in de stad andere consequenties hebben dan op de snelweg; voor een fietser is het prettig enige ruimte te houden tussen hem en een rijdende auto. Daarnaast kan het zo zijn dat de infrastructuur oplossingen moet faciliteren om de weggevalen communicatie tussen de bestuurder van de auto en overige weggebruikers op te vangen. Onderzoek naar communicatie tussen ZRA's en overige weggebruikers is tot nog toe schaars (Clark e.a., 2016). De infrastructuur kan bijdragen aan het oplossen van problemen die voorkomen bij communicatie tussen weggebruikers en ZRA's, maar of dit efficiënt en nodig is blijkt niet uit de literatuur. Uit afgenomen interviews blijkt een verscheidenheid aan oplossingen nuttig. Zo is een zebrapad een goed herkenbaar punt voor een ZRA en is de voetganger verzekerd van voorrang bij het oversteken (Bijlage B). Zebrapaden in grote getale neerleggen zou dus een mogelijke oplossing zijn voor het wegvalen van communicatie tussen de auto en overig verkeer. Een andere mogelijke oplossing is het maken van eenrichtingswegen in de stad. Conflictsituaties nemen af en de omgeving van de ZRA wordt eenvoudiger (Bijlage C). Er wordt momenteel nagedacht over concrete oplossingen voor dit probleem, deze zijn momenteel nog niet bekend (Bijlage A). Dat deze factor impact heeft op de infrastructuur is zeker, wat die impact kan zijn is vooralsnog grotendeels onbekend.

### 4.1.4 Penetratiegraden ZRA

Penetratiegraden van de ZRA geven aan hoeveel ZRA's zich begeven in het verkeer (Willumsen en Kohli, 2016). Ontwikkelingen omtrent de technologie van de ZRA moeten duidelijkheid geven over de functionaliteit van de ZRA in de stad. De impact van overige omschreven factoren hangt sterk af van de penetratiegraden. Hiermee is ook de impact op de infrastructuur per scenario afhankelijk van de verwachte penetratiegraden. Verschillende studies geven uitsluitsel over verwachte penetratiegraden van de ZRA en deze verwachtingen variëren sterk. In een onderzoek uitgevoerd door Milakis et al. (2017) wordt aan de hand van vier scenario's de ontwikkeling van de ZRA beschreven. De twee *driving forces* die de scenario's met name vormen, zijn de mate van technologische ontwikkeling en het beleid rondom de ZRA vanuit de overheid. Op basis van interviews met experts zijn hier penetratiegraden bepaald per scenario. In een scenario waarin technologische ontwikkeling niet snel gaat en er geen aanmoedigend beleid vanuit de overheid plaatsvindt, is de verwachting dat er in 2050 rond de 7 procent van het totaal aantal voertuigen gedeeltelijk autonoom is. Een scenario met hoge technologische ontwikkeling en een ondersteunend beleid toont een verwachte penetratiegraad van 61 procent met voornamelijk volledig autonome auto's. De verschillen tussen de scenario's, gebaseerd op de techniek en politiek, zijn groot. In een onderzoek uitgevoerd door Willumsen et al. (2016), is op basis van verwachtingen van experts bepaald wanneer tien procent van de auto's ZRA's zijn. De verwachtingen lopen hier uiteen van 2020 tot 2036. In de scenario's zullen de optimistische en de pessimistische verwachtingen gescheiden worden. De penetratiegraden van de ZRA sturen indirect de impact van de overige factoren op de infrastructuur. Zoals bij de factor eigendomsstructuur geconcludeerd wordt, kent een volledig zelfrijdende vloot andere implicaties als een vloot waarin ook private auto's rijden. Bij een grotere autonome vloot

kan volgens Milakis et al. (2017) een grotere wegcapaciteit ontstaan. Doordat veel menselijk handelen wegvalt, verlopen verkeerssituaties soepeler en wordt efficiënter gebruik gemaakt van de weg.

#### 4.1.5 Benodigde wegcapaciteit

Een vraag die opkomt bij de ontwikkeling van de ZRA is of de hoeveelheid infrastructuur die nu aanwezig is, kan voldoen aan de mogelijke vraag naar vervoer in de toekomst, of dat de infrastructuur in de toekomst voor autoverkeer af kan nemen. Een groeiende bevolking en een grotere vraag naar mobiliteit zullen veel druk leggen op de bestaande infrastructuur. Volgens het Kennis Instituut Mobiliteit zal, afhankelijk van de economie, het autogebruik tussen 2020 en 2040 toenemen met minstens 14 en maximaal 68 procent (Harms e.a., 2011). In een onderzoek uitgevoerd door Shladover et al. (2012) wordt aangetoond hoe auto's uitgerust met CACC (*Cooperative Adaptive Cruise Control*) het mogelijk maken dat de capaciteit van een autosnelweg vergroot wordt. De auto's met dit systeem zijn in staat om andere auto's te volgen en snel te reageren bij verandering van snelheid. Deze snelle reactie zorgt dat de ruimte op de weg efficiënt gebruikt wordt. De ZRA is ook tot deze handelingen in staat en heeft, wanneer communicatie tussen voertuigen (V2V) aanwezig is, nog meer input om te reageren op omliggende voertuigen. Een onderzoek uitgevoerd door Fagnant en Kockelman (2015) toont inderdaad aan dat de ZRA kan bijdragen aan een hogere wegcapaciteit, mits de penetratiegraden van de ZRA hierin voldoende zijn. Of er dan ook voldoende infrastructuur aanwezig is, is een andere vraag. Dit heeft volgens Fagnant en Kockelman ook te maken met in hoeverre de vraag naar vervoer zal toenemen. Shladover et al. toont aan dat auto's met CACC, met een penetratie level van 10, 50 en 100 procent respectievelijk de wegcapaciteiten op de autosnelweg vergroten met 1, 21 en 80 procent (Shladover e.a., 2012). Voor een ZRA die in staat is tot communicatie met andere voertuigen (V2V) zou dit nog hoger kunnen liggen. Het kan niet worden aangenomen dat de toegenomen wegcapaciteit in een stedelijke omgeving net zo groot is als op de autosnelweg. Er zijn teveel andere factoren die de wegcapaciteit bepalen. Wel is duidelijk dat een ZRA zorgt voor efficiënter weggebruik. De bevinding bij de factor eigendomsstructuur, dat het aantal auto's op de weg kan toenemen bij een situatie met private en zelfrijdende auto's, doet afvragen of die toename van efficiënter weggebruik genoeg is om toekomstig autoverkeer te kunnen faciliteren.

## 4.2 Scenario's

### 4.2.1 Geen ZRA

#### Ontwikkeling

Ondanks andere verwachtingen in 2018 kan de ZRA nog niet functioneren in de stad. Level 4 ZRA's kunnen al gemaakt worden maar vooral conventionele auto's en level 3 ZRA's zijn in gebruik. De level 3 ZRA functioneert alleen op wegen buiten de stad die daarvoor geschikt zijn. De ethische vraagstukken rondom de ongevallen veroorzaakt door de ZRA is een te groot maatschappelijk probleem gebleken (Bijlage B) en belemmert de adaptatie van de ZRA. Dit, een slechte technologische vooruitgang en een niet-ondersteunend beleid vanuit de politiek heeft geleid tot een penetratiegraad ZRA's van slechts 7 procent (Milakis e.a., 2017). Ook is gebleken dat de ZRA in veel situaties in een stad nog niet in staat is om zich snel voort te kunnen bewegen. Dit is nodig, wil de ZRA voordeel opleveren in een stad (Bijlage C). De level 3 auto's zouden zich in veel omstandigheden en op veel plaatsen in de stad wel redden zonder bestuurder; de overgang van autonoom rijden naar bestuurd worden in situaties waar dit niet kan, is een te grote uitdaging gebleken tot nog toe (Bijlage D). Al met al maakt dit dat het zelf laten rijden van auto's in de stad niet toegestaan is. Ontwikkelingen hebben zich wel voorgedaan binnen andere vervoerssystemen. Het beleid van de gemeente Enschede heeft geleid tot een hoog fietsgebruik voor mensen die zich binnen de stad van A naar B verplaatsen. Een maatregel die geleid heeft tot dit fietsgebruik is de ontvlechting van fietsroutes



in de stad. Deze ontvlechting zorgt voor directere verbindingen tussen belangrijke bestemmingen met minder oponthoud (Gemeente Enschede, 2011). Ook is het fietsgebruik regionaal toegenomen. Fietssnelwegen naar Almelo en Hengelo, naar Oldenzaal en naar Gronau creëren een snelle conflictloze verbinding met de steden (Gemeente Enschede, 2011). Een verbeterd openbaar vervoer heeft geleid tot een verhoogde mobiliteit en blijkt een goed alternatief voor de auto. Het delen van auto's is gestaag toegenomen; mensen hechten toch nog sterk waarde aan persoonlijk bezit.

### **De infrastructuur in Enschede**

Ondanks dat de ZRA niet in staat is om te functioneren in de stad, is de impact van de ZRA op de infrastructuur niet volkomen uitgebleven. De ontwikkeling van communicatietechnieken in en rondom de ZRA hebben ook hun ingang gevonden in de stad. Ook conventionele auto's zijn in staat tot communiceren met de omgeving. In zone B en C zijn VRI's zo doorontwikkeld dat deze in staat zijn te communiceren met auto's (Bijlage A), wat tot gevolg heeft dat een betere regulering bij kruispunten plaatsvindt, en dus een betere doorstroming. Een 5G netwerk is ontwikkeld en aangelegd om de grote hoeveelheden data te kunnen verwerken. De auto's worden in de stad door personen bestuurd; belijning en magneetsensoren zijn, in tegenstelling tot de geschikte wegen buiten de stad, niet aangebracht. De penetratie graad van 7 procent heeft niet veel invloed op de infrastructuur, gezien de afwezigheid van de ZRA in de stad. De benodigde wegcapaciteit is, door het beleid van de gemeente, gelijk gebleven afgelopen 15 jaar. Het toegenomen autogebruik (Harms e.a., 2011) wordt genivelleerd door het gestimuleerde fietsgebruik van de gemeente (Gemeente Enschede, 2011), de investeringen in het OV (Gemeente Enschede en Goudappel Coffeng, 2018) en de effecten van de implementatie van V2I communicatie. De ZRA draagt door de lage penetratiegraad, de beperkte techniek en de afwezigheid in de stad nog niet bij aan de ontwikkeling van auto delen. Van interactie tussen een ZRA en een overige weggebruiker is in dit scenario geen sprake. Het toegenomen autogebruik vereist meer parkeerplaatsen in de stad; het auto delen is te weinig toegenomen om dit te kunnen compenseren. Een opsomming van de consequenties:

#### **Impact ZRA infrastructuur**

- Aanwezigheid 5G netwerk
- VRI's in staat tot V2I communicatie (Zone B en Zone C)
- Meer parkeerplaatsen

### **4.2.2 ZRA in ontwikkeling**

#### **Ontwikkeling**

In 25 jaar zijn redelijk grote veranderingen ontstaan in het straatbeeld van Nederland. Level 4 ZRA's kunnen geproduceerd worden en zijn op grote schaal verkocht. De conventionele auto bevindt zich ook nog in het verkeer (Bijlage A). Wel zijn deze auto's in staat tot V2I communicatie; het delen van informatie over locaties van alle auto's is noodzakelijk gebleken om zelfrijdend verkeer in de stad mogelijk te maken (Bijlage B). Na de ontwikkeling van level 1 en level 2 ZRA's 25 jaar geleden leek het een logische stap dat de level 3 ZRA zijn intrede in de markt zou doen. Dit is niet gebeurd, omdat level 3 auto's zich niet goed genoeg konden redden in complexe situaties; de omschakeling van autonoom rijden naar bestuurd worden bij deze ZRA's bleek problematisch (Bijlage D). Daarom ging de ontwikkeling door totdat ZRA's met level 4 eigenschappen geproduceerd konden worden. Deze ZRA heeft zijn intrede in de stad gedaan. Innovaties en implementaties van V2V en V2I systemen zijn sneller gegaan dan verwacht en hebben hier ook aan bijgedragen (Bijlage A). Gemaakte afspraken vanuit de Europese Commissie hebben hier aan bijgedragen (Bijlage D). Deze goede technologische ontwikkeling, maar een meer afwachtende houding van beleidsvoerders, heeft geleid tot een penetratiegraad van de ZRA van 25 procent (Milakis e.a., 2017). Het delen van auto's is redelijk toegenomen;

mensen hechten minder sterk waarde aan persoonlijk bezit.

### **De infrastructuur in Enschede**

De aanwezigheid van de level 4 ZRA's in de stad heeft verschillende implicaties gehad. Allereerst zijn de VRI's in zone B en C in staat om met de ZRA's te communiceren en zijn wegkant systemen aangebracht om verdere V2I communicatie te ondersteunen. De exacte locatiebepaling van de ZRA vraagt om een goede belijning (met name in zone B) en een verscheidenheid aan sensoren in zone B en C, bijvoorbeeld magnetisch en digitaal (Morsink e.a., 2016). Een goede 5G verbinding is overal in de stad noodzakelijk gebleken om de grote hoeveelheden data, nodig voor de exacte positiebepaling van elke auto en ZRA in de stad, mogelijk te maken (Seif en Hu, 2016). Grote veranderingen in de structuur van de stad zijn er niet geweest. Gescheiden infrastructuur, zoals op de snelwegen een reële optie is gebleken, was in de stad niet haalbaar, dit is was te kostbaar (Bijlage C). Gebrek aan ruimte speelt hierbij ook een rol (Bijlage B). Daarnaast bleek maatschappelijk gezien het faciliteren van aparte infrastructuur voor eigenaren van een ZRA onwenselijk (Bijlage B). De ZRA's rijden daarom op dezelfde banen als het overig verkeer, in zone B en C. De ZRA is niet in staat om in wegsituaties met een hoge complexiteit (Zone A) te functioneren. Op zone A wegen dient de bestuurder dan ook zelf de auto te besturen. De lage penetratiegraad maakt dat vanuit de infrastructuur geen concrete oplossingen zijn aangereikt om in deze complexe gebieden oplossingen te faciliteren en daarmee zelfrijdend vervoer mogelijk te maken (Bijlage B). Het autogebruik is toegenomen (Harms e.a., 2011) maar de betere doorstroming in de stad ten gevolge van de V2I communicatie maakt dat de bestaande hoeveelheid infrastructuur altijd voldaan heeft. Ook is de parkeerbehoefte in de stad gelijk gebleven; een toename in auto delen maakt dat het persoonlijk autobezit omlaag is gegaan. De ontwikkeling van de ZRA heeft geen groot effect op auto delen; deze is namelijk niet in staat zonder bestuurder te rijden. Een opsomming van de consequenties:

### **Impact ZRA infrastructuur**

- Aanwezigheid 5G netwerk
- Zone B en C: VRI's in staat tot V2I
- Zone B en C: Wegkantsystemen V2I
- Zone B en C: Goede belijning, sensoren in wegdek

## **4.2.3 ZRA in gebruik**

### **Ontwikkeling**

Indrukwekkende veranderingen hebben zich voorgedaan in Nederland. Conventionele auto's zijn uit het straatbeeld verdwenen en hebben plaatsgemaakt voor level 4 ZRA's. De penetratiegraad van de ZRA ligt dan ook op 100 procent (Bijlage A). De overheid heeft hierin een actieve rol gespeeld, maatregelen werden getroffen om het gebruik van de conventionele auto te ontmoedigen en uiteindelijk te verbieden. Technische ontwikkelingen alleen waren niet genoeg, er moest ook iets aan de andere kant gebeuren (Bijlage B). Een grote stimulans voor de overheid was de toegenomen verkeersveiligheid bij een hoge graad ZRA's (Bijlage A). Het aantal verkeersongelukken is nu sterk afgenomen. Ook heeft auto delen een grote impuls gekregen. In het autodelen is een sterke groei ontstaan, verduurzaming van de samenleving heeft hier aan bijgedragen (Bijlage C).

### **De infrastructuur in Enschede**

De aanwezigheid van de level 4 ZRA's in de stad heeft vele implicaties gehad. Allereerst zijn VRI's (Zone B en C) in staat om met de ZRA's te communiceren en zijn wegkant systemen aangebracht om verdere V2I communicatie te ondersteunen; deze zijn nodig om zelfrijdend vervoer in de stad mogelijk te maken (Bijlage D). De exacte locatiebepaling van de auto vraagt om een goede belijning (met name zone B) en een verscheidenheid aan sensoren, bijvoorbeeld

magnetisch en digitaal (Morsink e.a., 2016). Om verkeer ook mogelijk te maken in gebieden met veel conflictsituaties (Zone A) is in een groot gedeelte van de wegen in Enschede alleen eenrichtingsverkeer toegestaan (Bijlage B). Dit maakt de omgeving voor de ZRA eenvoudiger, mogelijke interacties tussen ZRA en overige weggebruikers verminderen en ruimte kan bespaard worden. Een voetganger maakt aan een ZRA duidelijk over te willen steken door het gebruiken van een digitaal zebrapad (Bijlage A). Een goede 5G verbinding is overal in de stad noodzakelijk gebleken om de grote hoeveelheden data, nodig voor de exacte positiebepaling van elke auto en ZRA in de stad mogelijk te maken (Seif en Hu, 2016). De toename van het autodelen heeft het nodige effect gehad op de openbare ruimtes. Parkeerbehoeftes zijn afgenomen en op veel plekken zijn ruimtes ontstaan die een aanvulling voor de groen- en loopvoorzieningen in de stad betekenen (Bijlage E). De benodigde wegcapaciteit is, door het goed kunnen communiceren van de ZRA's (V2V), de verbeterde rijstijl van de ZRA en de penetratiegraad van 100 procent (Fagnant en Kockelman, 2015), afgenomen. Dit betekent een betere doorstroming in de stad en een mindere mate van vervuiling. De afwezigheid van conventionele auto's en de eigenschappen van de ZRA maken dat rijstroken minder breed hoeven te zijn (Morsink e.a., 2016). Een opsomming van de consequenties:

#### **Impact ZRA infrastructuur**

- Aanwezigheid 5G netwerk
- Zone B en C: VRI's in staat tot V2I
- Zone A, B en C: Wegkantsystemen V2I
- Zone B en C: Goede belijning, sensoren in wegdek
- Zone B en C: Smallere rijstroken
- Zone A: Digitale zebrapaden
- Zone A: Eenrichtingsverkeer

#### **4.2.4 ZRA onmisbaar**

##### **Ontwikkeling**

In 25 jaar is Nederland op het gebied van mobiliteit volledig over de kop gegaan. In 2018 werd door sommige experts wel verwacht dat de level 5 auto er zou gaan komen (Bijlage B), maar dat het zo snel zou gaan, hadden weinigen voorzien. De verduurzaming van de samenleving (Bijlage C) en het grote aantal verkeersongevallen die door het gebruik van de conventionele auto veroorzaakt werden, maakten dat een revolutionaire omgang plaatsvond in de omgang met mobiliteit (T. Tillema e.a., 2015). Een snelle technologische ontwikkeling en een grote stimulerende rol van de overheid waren hierin leidend. (Milakis e.a., 2017). Persoonlijk autobezit is verdwenen en auto delen is de normaalste gang van zaken. De reiziger betaalt nu voor het reizen in plaats van voor het reismiddel (Connekt, 2017). De efficiëntie van de level 5 ZRA heeft er aan bijgedragen dat traditionele openbaarvervoerssystemen verdwenen zijn uit de stad (T. Tillema e.a., 2015). Omdat het systeem zo goed werkte, nam de vraag naar zelfrijdend vervoer enorm toe (Bijlage B). Om de leefbaarheid in de stad te waarborgen heeft de overheid maatregelen genomen om het aantal ritten per persoon in te perken. Ook bleek het toepassen van zonering in de stad een logische stap; de ZRA kan én hoeft niet overal te komen (Bijlage D).

##### **De infrastructuur in Enschede**

De level 5 ZRA kent verschillende implicaties op de infrastructuur. De VRI's en verkeersborden zijn niet meer nodig voor de auto's; dit geldt niet voor de kwetsbare weggebruiker (fietsers en voetgangers) (Farah, 2016). Wegkant systemen in staat tot V2I communicatie zijn wel van belang en aanwezig, evenals sensoren in het asfalt en belijning. Belijning is niet essentieel voor de level 5 ZRA; de kwetsbare weggebruiker heeft er baat bij te weten waar de ZRA wel en niet

rijdt (Merat e.a., 2018), belijning helpt hier bij. De rijstroken in de stad zijn smaller vanwege de nauwkeurige locatiebepaling van de ZRA. Om verkeer ook mogelijk te maken in gebieden met veel conflictsituaties (Zone A) is in een groot gedeelte van de wegen in Enschede alleen eenrichtingsverkeer toegestaan (Bijlage B). Dit maakt de omgeving voor de ZRA eenvoudiger, mogelijke interacties tussen de ZRA en overige weggebruikers verminderen en ruimte kan bespaard worden. Een voetganger maakt, in gebieden zonder VRI's (Zone A), aan een ZRA duidelijk over te willen steken door het gebruiken van een digitaal zebrapad (Bijlage A). Een goede 5G verbinding is overal in de stad noodzakelijk gebleken om de grote hoeveelheden data, nodig voor de exacte positiebepaling van elke auto en ZRA in de stad, mogelijk te maken (Seif en Hu, 2016). Doordat de ZRA nu zonder bestuurder kan functioneren is in de stad parkeren niet meer noodzakelijk, deze worden dan ook aan de rand van de stad geparkeerd (T. Tillema e.a., 2015). De overgang van persoonlijk autobezit naar het delen van auto's en de penetratiegraad van 100 procent level 5 ZRA's maakt dat met veel minder ZRA's de gevraagde mobiliteit bediend kan worden, wat een sterke afname in de parkeervraag betekent. Een opsomming van de consequenties:

### **Impact ZRA infrastructuur**

- Aanwezigheid 5G netwerk
- Zone B en C: Geen VRI's en verkeersborden nodig voor de ZRA
- Zone A, B en C: Wegkant systemen V2I
- Zone B en C: Goede belijning, sensoren in wegdek
- Zone B en C: Smallere rijstroken
- Zone A: Digitale zebrapaden
- Zone A: Eenrichtingsverkeer
- Verplaatsing van parkeerplekken in de stad naar de rand van de stad
- Sterke afname parkeerbehoefte
- Meer ruimte voor groen, voetgangers en fietsers

## **4.3 No Regret maatregelen**

### **4.3.1 Digitale infrastructuur**

Een evident onderwerp binnen het mogelijk maken van de ZRA in de stad, en iets wat in elk scenario terugkomt, is de aanwezigheid van communicatie. De complexiteit van de stad maakt dat automatisering van de auto alleen niet voldoet. Een eerste stap in het mogelijk maken van deze communicatie is het in staat stellen van VRI's om te kunnen communiceren met de omgeving (V2I)(Bijlage D). Dit kent bijkomende voordelen buiten de ontwikkeling van de ZRA om. Kruispunten met VRI's in staat tot communicatie hebben een betere doorstroming tot gevolg. *Real time* informatie over wachtende en aanrijdende voertuigen zorgt hier voor een betere regulering. Ook kan de data die deze VRI's kunnen verzamelen bijdragen aan een verbeterd verkeersmanagement. Een logische stap om te nemen is om dit vooralsnog eerst te implementeren voor het OV in de stad, specifiek voor de bus (Bijlage A). De aparte infrastructuur maakt dit een relatief eenvoudige omgeving. Wanneer de bus informatie krijgt over de groentijd van de VRI kan deze de snelheid aanpassen en hoeft er niet gestopt te worden bij een kruispunt. Het implementeren in het OV maakt de gemeente bekend met de techniek en maakt implementatie voor de auto eenvoudiger. Belangrijk in het nemen van deze stap is om te proberen Europese standaarden aan te hangen betreft deze techniek (Bijlage B), want de Europese Commissie is bezig met het ontwikkelen van standaarden (European

Commissie, 2018). Platform *C-roads*, een gezamenlijk initiatief van verschillende Europese lidstaten, kent als doel om de implementatie van C-ITS systemen op een gelijke manier te laten verlopen, met als gevolg interoperabiliteit tussen verschillende landen mogelijk wordt. Zij stellen specificaties op voor de wegwijk systemen (Bijlage C). Een vereiste voor goede communicatie en het overbrengen van data is een internetnetwerk met voldoende capaciteit en bereik. Het is wenselijk dat overal in de stad glasvezel ligt (Bijlage A). Waar de gemeente nu ook mee bezig moet zijn, is het ontsluiten van verkeersdata (Bijlage D). De gemeente moet weten waar alle borden staan en de verkeersmanagement informatie moet op orde zijn. Een volledig beeld van de stad hebben is belangrijk voor het communiceren van informatie naar voertuigen.

### 4.3.2 Fysieke infrastructuur

Een mogelijkheid om te anticiperen op toekomstig zelfrijdend verkeer is het verhogen van de kwaliteit van belijning en markeringen. Ook het toewerken naar uniforme afspraken hierover kan bijdragen aan de implementatie van de ZRA in de stad (Morsink e.a., 2016). ZRA's hebben baat bij goede belijning; wat de specifieke eisen zijn, moet nog onderzocht worden. Een bijkomend voordeel is dat de conventionele weggebruiker ook kan profiteren van verbeterde belijning en markering. Zichtbaarheid van verkeersborden is voor een ZRA ook van belang. Kennis van de locatie van alle verkeersborden is hierin ook een logische stap (Bijlage D). De ZRA kan effect hebben op de wegdekqualiteit. Vaststellen hoe groot dit effect is en wat het gevolg is voor de eisen aan het wegdek kan toekomstige kosten voorkomen (Morsink e.a., 2016).

### 4.3.3 Overig

De toekomst omtrent de ontwikkeling van de ZRA maakt ook de toekomst omtrent OV in de stad onzeker. De ontwikkeling van de ZRA kan in sommige opzichten een enorme stimulans betekenen voor het OV; zelfrijdende bussen of metro's zijn niet ondenkbaar. In het scenario *ZRA onmisbaar* treedt de ZRA op als vervanger van het OV. De volledige delende level 5 ZRA is in veel opzichten een beter alternatief voor een bus of metro. Dit doet de vraag rijzen of investeringen in het OV, met de ZRA op komst, nog wel voordeel opleveren. De komst van de level 5 ZRA is nog lang niet ter sprake; maar investeringen in een nieuw OV systeem zijn in principe voor de lange termijn. Om hier mee om te gaan kan de gemeente OV systemen zo adaptief mogelijk maken (Taede Tillema e.a., 2017). Langdurige contracten en concessies maken bieden hiertoe een mogelijkheid.

De parkeerbehoefte en de locaties van parkeerplaatsen kunnen beide veranderen door de ontwikkeling van de ZRA. Direct het beleid betreft parkeren hierop aanpassen is te voorbarig; nadenken over hoe dit mogelijk in te passen is in de toekomst kan nuttig blijken (Bijlage B). Ook kan zelfrijdend vervoer een rol gaan spelen bij Park and Rides (Bijlage A). Ook het plan-technisch overwegen van routes voor zelfrijdend verkeer en het inpassen van eenrichtingswegen, zonder hier het beleid verder op aan te passen, kan helpen bij besluitvorming in de toekomst (Bijlage B). Om verder snel te kunnen reageren op toekomstige ontwikkeling kan de gemeente op korte termijn uitzetten welke ontwikkelingen mogelijk plaats kunnen vinden, en hierbij bepalen wat de implicaties voor de stad zijn. Wanneer deze ontwikkelingen vervolgens nauwlettend gevolgd worden, kunnen deze uitzettingen snel omgezet worden in beleid (Bijlage C).

## 5 Conclusie

In dit onderzoek is geprobeerd antwoord te vinden op de vraag: *Wat is de impact van de ontwikkeling van de zelfrijdende auto op de infrastructuur in de gemeente Enschede?* Om deze vraag te kunnen beantwoorden zijn met behulp van een literatuuronderzoek en het afleggen van interviews verschillende scenario's opgesteld waarin de infrastructuur voor over 25 jaar wordt geschetst in Enschede. Op basis hiervan zijn *no regret* maatregelen opgesteld die de gemeente Enschede nu al in acht kan nemen.

Uit de resultaten kwam naar voren dat een vijftal factoren rondom de ZRA de infrastructuur vormgeven. Deze factoren zijn:

- De zelfrijdende auto
- De eigendomsstructuur
- De interactie tussen de zelfrijdende auto en overig verkeer
- De penetratiegraden van de zelfrijdende auto
- De benodigde wegcapaciteit

De factoren hebben los van elkaar, maar ook samen impact op de infrastructuur. Zo heeft de ZRA vanuit de infrastructuur goede belijning en sensoren nodig om zijn locatie te kunnen bepalen. De benodigde wegcapaciteit in de stad Enschede is in een situatie met 100 procent level 4 auto's anders dan in een situatie met gemengd verkeer. De onzekerheid in deze factoren heeft als gevolg dat op basis van verwachtingen uit de literatuur en interviews scenario's zijn opgesteld. Deze verwachtingen bestaan uit de verwachte penetratiegraad van de ZRA en verwachte technische ontwikkeling van de ZRA. Dit heeft geleid tot een viertal scenario's waarin de vijf factoren samen de infrastructuur vormgeven voor over 25 jaar. In het vierde scenario, *ZRA onmisbaar*, zijn niet-realistische verwachtingen voor over 25 jaar geschetst, maar in dit scenario wordt voornamelijk gekeken naar wat de verwachtingen van de ZRA op een nog langere termijn zijn, om te bepalen waar de ontwikkeling mogelijk naar toe gaat. In de overige scenario's liggen de verwachtingen ver uit elkaar. Uit deze scenario's blijkt dat de aanwezigheid van VRI's en wegkant systemen in staat tot V2I communicatie nodig zijn om zelfrijdend vervoer in de stad mogelijk te maken. Ook zijn correcte belijning, sensoren en zichtbare verkeersborden voor een level 4 ZRA van belang om te functioneren in een stad. Een goede manier om zelfrijdend vervoer in complexe situaties mogelijk te maken, en hiermee de problemen omtrent de interactie tussen de ZRA en overig verkeer te verkleinen, is het invoeren van eenrichtingsverkeer. Het aantal conflicten wordt verkleind en de situatie is voor de ZRA eenvoudiger. Voor overstekende voetgangers zijn tal van oplossingen denkbaar; één hiervan is een digitaal zebra-pad. Grote voordelen die de ZRA mogelijk kan hebben omtrent de infrastructuur komen pas naar voren bij een verre technische ontwikkeling van de ZRA en in een situatie waarin geen conventionele auto's zijn. Zo kan de ZRA alleen een grote bijdrage leveren aan het delen van auto's wanneer level 5 bereikt is. Het verdwijnen van parkeerplaatsen en ruimtebesparing op de weg zijn ook pas in een optimistisch scenario mogelijk. Over de benodigde hoeveelheid infrastructuur en de ontwikkelingen omtrent het auto delen kan slechts gespeculeerd worden, hierin is nog weinig bekend. Ook opvallend is dat echt grote veranderingen in de infrastructuur niet in de verwachtingen liggen. De structuur van een stad kan niet zomaar worden aangepast en het ontwerpen van totaal nieuwe infrastructuur is overbodig en veel te kostbaar. De resultaten hebben tot slot geleid tot een overzicht aan maatregelen die de gemeente nu al in acht kan nemen om te kunnen anticiperen op toekomstig zelfrijdend vervoer. De maatregelen zijn klein in aantal, vooral op het gebied van fysieke infrastructuur. Hier zijn twee redenen voor; de impact van de ZRA op de fysieke infrastructuur is tot nog toe weinig onderzocht en de ontwikkeling van de ZRA kent hele grote onzekerheden. Wat wel uit de resultaten blijkt, is dat voornamelijk op het gebied van communicerende VRI's maatregelen genomen kunnen worden; deze brengen nu al voordeel. Een beknopt overzicht van de *no regret* maatregelen:

- VRI's in staat stellen tot V2I communicatie
- Glasvezel overal in de stad aanleggen
- Ontsluiten verkeersdata en op orde stellen verkeersmanagement
- OV systemen zo adaptief mogelijk houden; ruimte laten voor toekomstige ontwikkelingen
- Belijning en markering, verkeersborden en wegdek kwaliteit op orde hebben (de eisen hiervoor moeten nog vastgesteld worden)
- Nadenken over inpassing parkeren toekomst
- Plantechnisch overwegen routes ZRA in stad

Uit dit scenario onderzoek is gebleken wat de impact van de ZRA op de infrastructuur in Enschede is, en wat voor onzekerheid daar nog in zit. Wel kan geconcludeerd worden dat de ZRA in de stad vooral baat heeft bij een goede digitale infrastructuur die communicatie tussen de ZRA en de infrastructuur mogelijk maakt. Voor de gemeente is het mogelijk om daar nu al een goede basis voor te gaan leggen en zich daarin te ontwikkelen. Verder is het voor de gemeente, naast niet mogelijk, niet nodig om grote aanpassingen aan de infrastructuur door te voeren om te anticiperen op zelfrijdend vervoer in de toekomst. De verwachtingen zijn nog te onzeker en algemene afspraken moeten nog gemaakt worden.

## 6 Discussie

Getracht is om met dit onderzoek meer inzicht te krijgen in de gevolgen van de ZRA in de stad op de infrastructuur, en wat die gevolgen nu betekenen voor de gemeente Enschede. Bestaande onderzoeken ((Farah, 2016; Morsink e.a., 2016) laten zien dat wat betreft de gevolgen van de ZRA voor de infrastructuur in de stad hierover nog weinig bekend is. De huidige ontwikkeling van de ZRA maakt dat dit vraagstuk meer aandacht verdient. Uit dit onderzoek is gebleken dat grote aanpassingen aan de fysieke infrastructuur in de stad niet mogelijk zijn. Nieuwe oplossingen die wél vanuit de fysieke infrastructuur uit dit onderzoek naar voren zijn gekomen zijn het maken van eenrichtingsverkeer en het toepassen van zonerings in de stad. Het aantal conflicten neemt hiermee af en er doen zich minder complexe situaties voor. Verder zullen voornamelijk V2I en V2V communicatie moet zorgen dat de ZRA in de stad kan rijden. Uit het onderzoek blijkt ook dat het kan lonen, en dat het mogelijk is voor de gemeente Enschede, om V2I communicatie nu mogelijk te maken in de stad. Aspecten die hierbij nodig zijn, zoals een goed glasvezelnetwerk en verkeersdata, moeten vanzelfsprekend ook op orde zijn.

Het onderzoek heeft geleid tot zeer uiteenlopende scenario's. Dit lag in lijn met de verwachtingen, de grote onzekerheid in de ontwikkeling van de ZRA en andere factoren zijn dan ook redenen geweest om scenario's op te stellen. De scenario's hebben een hoog speculatief gehalte. Aannames over bijvoorbeeld de ontwikkeling van de eigendomsstructuur van de auto moesten gedaan worden om tot een compleet scenario te komen, uitvoerig onderzoek doen naar deze ontwikkeling is gezien de tijdsperiode van het onderzoek niet realistisch. De focus lag vooral op het laten meetellen van alle factoren die de infrastructuur kunnen beïnvloeden, om een zo compleet mogelijk beeld neer te zetten. De gemaakte aannames zijn echter niet geheel onrealistisch, ze zijn gebaseerd op verwachtingen van experts. Het gevolg is wel dat men zich moet afvragen hoe realistisch de scenario's betreft de ontwikkeling van de factoren zijn. Wel kan goed bepaald worden hoe een combinatie van verschillende factoren impact heeft op de infrastructuur in de stad. Verschillende opinies en gedachten van experts en uit de literatuur zijn bij elkaar geplaatst. Deze combinatie van logische gebeurtenissen leidt tot een beschreven ontwerp en verandering in de infrastructuur van Enschede die hiermee goed onderbouwd is.

De verwachting was dat de ZRA grote implicaties zou hebben op de infrastructuur. Deze verwachting is voornamelijk in de eerste drie scenario's niet uitgekomen. Een grote reden hiervoor is dat in de eerste twee scenario's ook nog conventionele auto's op de weg rijden. In het derde scenario is de ZRA technisch nog niet in staat om in elke situatie zelf te rijden, dus moet een bestuurder ook in staat zijn zich op de weg voort te bewegen. Een andere reden is de afwezigheid van kennis op dit gebied. Het kan dus zo zijn dat in de toekomst blijkt dat er meer implicaties op de infrastructuur bestaan dan nu beschreven. Van de implicaties die nu wel beschreven staan is ook nog veel onbekend. Eisen aan het wegdek, belijning en verkeersborden zijn nog niet onderzocht. De genoemde digitale zebra's zijn een niet-onderzochte oplossing. De reden om deze toch neer te zetten is om aan te tonen dat er wel degelijk implicaties zijn. Deze weglaten doet de illusie wekken dat er geen oplossingen nodig zijn. De opgestelde *no regret* maatregelen volgen uit de scenario's en komen uit literatuuronderzoek en afgenomen interviews. De kleine hoeveelheid implicaties en de verwachting dat de introductie van de ZRA in de stad nog ver weg ligt, heeft geresulteerd in *no regret* maatregelen waarin nog weinig aanpassingen worden vereist wat betreft de infrastructuur. Implicaties waarvan de eisen nog niet bekend zijn, zoals het aanpassen van belijning, zijn desondanks toch meegenomen. Het uitvoeren van deze maatregel kan, wanneer de eisen bekend zijn, voordeel opleveren voor de gemeente Enschede. Het in de gaten houden van ontwikkelingen omtrent de ZRA en de gevolgen daarvan voor de infrastructuur is dan ook een advies dat volgt uit de getrokken conclusies. De opgezette *no regret* maatregelen bieden al enige mogelijkheden om te kunnen anticiperen op toekomstig zelfrijdend verkeer. Het verder uitwerken van deze maatregelen brengt kansen om als stad al vroeg van de ontwikkeling van de ZRA te profiteren, ook voor de conventionele weggebruikers in de stad.



## Referenties

- Burns, C. M. (2016). Autonomous Driving in the Real World : Experiences with Tesla Autopilot and Summon. (February 2017). doi:10.1145/3003715.3005465
- Clark, B., Parkhurst, G. & Ricci, M. (2016). Introducing Driverless Cars to UK Roads. *9*, 1–17. Verkregen van <http://eprints.uwe.ac.uk/29134>
- Connekt, I. N. (2017). Nederlands actieplan Mobility-as-a-Service, 20. Verkregen van <https://www.connekt.nl/wp-content/uploads/2017/06/Actieplan-MaaS-2017.pdf>
- European Commission. (2018). On the road to automated mobility: An EU strategy for mobility of the future. Verkregen van [https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/3rd-mobility-pack/com20180283%7B%5C\\_%7Den.pdf](https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/3rd-mobility-pack/com20180283%7B%5C_%7Den.pdf)
- Fagnant, D. J. & Kockelman, K. (2015). Preparing a nation for autonomous vehicles: Opportunities, barriers and policy recommendations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *77*, 167–181. doi:10.1016/j.tra.2015.04.003. arXiv: arXiv:1011.1669v3
- Farah, H. (2016). State of Art on Infrastructure for Automated Vehicles. (December). Verkregen van <http://knowledgeagenda.connekt.nl/engels/impact-infrastructure/>
- Färber, B. (2016). Communication and Communication Problems Between Autonomous Vehicles and Human Drivers, 125–144. doi:10.1007/978-3-662-48847-8
- Gasser, T. M. (2016). Law and liability. *Autonomous Driving: Technical, Legal and Social Aspects*, 519–521. doi:10.1007/978-3-662-48847-8
- Gemeente Enschede. (2011). Enschede fietsstad 2020.
- Gemeente Enschede & Goudappel Coffeng. (2018). Mobiliteitsvisie Enschede: Leefbaar, Aantrekkelijk en Bereikbaar. Stap 1: discussienota.
- Hannah, K. & Gabner, R. (2008). *Methods of Future and Scenario Analysis*. doi:ISBN978-3-88985-375-2
- Harms, L., Jorritsma, P., 't Hoen, A. & van de Riet, O. (2011). Blik op de personenmobiliteit. (November).
- International, S. (2016). Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. Verkregen van [https://www.sae.org/standards/content/j3016\\_201609/](https://www.sae.org/standards/content/j3016_201609/)
- Isaac, L. (2015). Driving Towards Driverless: A Guide For Government Agencies. *Wsp*, 45. Verkregen van <https://www.crow.nl/testenzelfrijdendeauto/bibliotheek-dutch-roads/driving-towards-driverless?page=2%7B%5C%7Dsearchsort=date%7B%5C%7Dpagesize=10%7B%5C%7Dparenturl=/testenzelfrijdendeauto/Bibliotheek-Dutch-Roads>
- Litman, T. (2014). Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning. *Transportation Research Board Annual Meeting*, (2014), 36–42. doi:10.1613/jair.301. arXiv: 9605103 [cs]
- Maurer, M., Gerdes, J., Lenz, B. & Winner, H. (2016). *Autonomous driving: Technical, legal and social aspects*. cited By 14. doi:10.1007/978-3-662-48847-8
- Merat, N., Louw, T., Madigan, R., Wilbrink, M. & Schieben, A. (2018). What externally presented information do VRUs require when interacting with fully Automated Road Transport Systems in shared space ? *Accident Analysis and Prevention*, (March). doi:10.1016/j.aap.2018.03.018
- Milakis, D., Snelder, M., Van Arem, B., Van Wee, B. & De Almeida Correia, G. H. (2017). Development and transport implications of automated vehicles in the Netherlands: Sce-

- narios for 2030 and 2050. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 17(1), 63–85. Verkregen van <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%7B%5C%%7D3A154a5dd5-3296-4939-99c7-776e3ba54745>
- Morsink, P., Klem, E., Wilmlink, I. & de Kievit, M. (2016). Zelfrijdende auto's. *Tno*, 46. Verkregen van <https://www.crow.nl/downloads/pdf/verkeer-en-vervoer/wegontwerp/zelfrijdende-autos-verkenning-van-implicaties-op-h.aspx?ext=.pdf>
- OECD. (2015). Urban Mobility System Upgrade: How shared self-driving cars could change city traffic. *Corporate Partnership Board Report*, 1–36. doi:10.1007/s10273-016-2048-3
- Prettenthaler, F. E. & Steininger, K. W. (1999). From ownership to service use lifestyle: The potential of car sharing. *Ecological Economics*, 28(3), 443–453. doi:10.1016/S0921-8009(98)00109-8. arXiv: arXiv:1011.1669v3
- Pune, N. (2016). STUDY OF CRUISE CONTROL SYSTEM USED, 75–83. Verkregen van [http://www.ijarse.com/images/fullpdf/1459175279%7B%5C\\_%7D248N.pdf](http://www.ijarse.com/images/fullpdf/1459175279%7B%5C_%7D248N.pdf)
- Rens, M. (1998). Changing consumer behaviour through eco-efficient services: an empirical study of car sharing in the Netherlands. *Business Strategy and the Environment*, 7(4), 234–244. doi:10.1002/(SICI)1099-0836(199809)7:4<234::AID-BSE159>3.0.CO;2-A
- Ross, C. & Guhathakurta, S. (2017). Autonomous Vehicles and Energy Impacts: A Scenario Analysis. *Energy Procedia*, 143, 47–52. doi:10.1016/j.egypro.2017.12.646
- Seif, H. G. & Hu, X. (2016). Autonomous Driving in the iCity—HD Maps as a Key Challenge of the Automotive Industry. *Engineering*, 2(2), 159–162. doi:10.1016/J.ENG.2016.02.010
- Shladover, S., Su, D. & Lu, X.-Y. (2012). Impacts of Cooperative Adaptive Cruise Control on Freeway Traffic Flow. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2324 (January), 63–70. doi:10.3141/2324-08
- Somers, A. & Weeratunga, K. (2015). AUTOMATED VEHICLES: ARE WE READY? Internal report on potential implications for Main Roads WA. 2(January). doi:10.1044/leader.PPL.20012015.20
- Spieser, Kevin, Ballantyne, K., Treleaven, Zhang, R., Morton, D. & Pavone, M. (2014). Toward a Systematic Approach to the Design and Evaluation of Automated Mobility-on-Demand Systems : A Case Study in Singapore The MIT Faculty has made this article openly available . Please share Citation Accessed Citable Link Detailed Terms Toward a Syst. Verkregen van <https://dspace.mit.edu/openaccess-disseminate/1721.1/82904>
- Tillema, T. [T.], Baveling, J., Gelauff, G., van der Waard, J., Harms, L. & Derriks, H. (2015). Driver at the wheel? Self-driving vehicles and transport system of the future. Verkregen van <http://kimnet.nl/sites/kimnet.nl/files/driver-at-the-wheel.pdf>
- Tillema, T. [Taede], Gelauff, G., van der Waard, J., Baveling, J. & Moorman, S. (2017). Paden naar een zelfrijdende toekomst. *Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid*. Verkregen van <https://www.kimnet.nl/publicaties/rapporten/2017/03/27/paden-naar-een-zelfrijdende-toekomst>
- Weeratunga, K. & Somers, A. (2015). Connected Vehicles: Are we ready? (June). Verkregen van <https://www.mainroads.wa.gov.au/Documents/Connect%20Vehicles%20Web.RCN-D15%7B%5C%%7D5E23413758.PDF>
- Willumsen, L. G. & Kohli, S. (2016). Traffic forecasting and autonomous vehicles. *European Transport Conference*, 1–14. Verkregen van <http://www.steerdaviesgleave.com/sites/default/files/elfinder/Traffic-forecasting-and-automated-vehicles-Kohli-Willumsen.pdf>

## Bijlagen

## F Interviewvragen

- Wat is uw functie binnen uw bedrijf?
- Waar ligt uw expertise? (Op het gebied van de ZRA)
- Welke factoren rondom de ZRA acht u van belang voor de infrastructuur?

Uit een verkennende studie tot nu toe zijn een aantal factoren naar boven gekomen rondom zelfrijdende auto's die de infrastructuur in een stedelijke omgeving zullen bepalen zoals:

- Techniek (Onderzoek Rijkswaterstaat 2016)
  - SAE-level
  - Wel of niet coöperatief
- Eigendomsstructuur
- Interactie tussen langzaam verkeer en ZRA (Onderzoek Rijkswaterstaat 2016)
- Penetratiegraden ZRA
- Wegcapaciteit
  - Verwachte vraag ZRA
  - ZRA eigenschappen
- Ontbreken er relevante factoren in deze opsomming? (In eerste instantie toelichten waarom deze er niet bij staan)

Aan de hand van deze factoren scenario's opstellen voor over 25 jaar. De scenario's:

- Geen ZRA (ter vergelijking)
- Pessimistische verwachtingen 25 jaar
- Optimistische verwachtingen 25 jaar
- All-in (SAE level 5 coöperatief)

Techniek

- Denkt u dat het mogelijk is dat over 25 jaar auto's met SAE level 3 of 4 geproduceerd kunnen worden die zich bevinden in stedelijk verkeer? En level 5?
- Wat zijn de mogelijke consequenties van een ZRA level 3,4 voor de infrastructuur in een stad? Kan een dergelijk auto in een omgeving met gemengd verkeer autonoom functioneren? Zijn gescheiden banen een vereiste voor deze auto's?

In kaart brengen huidige ontwikkelingen binnen coöperatieve systemen:

- Auto's die momenteel op de markt komen hebben geen coöperatieve systemen. Wanneer verwacht u dat deze intrede gaan doen?
- V2V systemen: Wat is het nut? Op wat voor termijn implementatie? Gevolgen infrastructuur?
- V2I systemen: Wat is het nut? Op wat voor termijn verwachte implementatie? Gevolgen infrastructuur?
- V2C systemen: Wat is het nut? Op wat voor termijn verwachte implementatie? Gevolgen infrastructuur?

- Wat zijn nog grote uitdagingen binnen deze technieken?

Verwachte vraag zelfrijdend vervoer

- Verwacht u grote veranderingen in de vraag naar vervoer met een auto wanneer deze zelfrijdend kan functioneren? (Zowel level 5 SAE; connected als Level 3 SAE; automated)
- Op wat voor manier kan deze factor bepalend zijn voor de fysieke infrastructuur?

Eigendomsstructuur

- Binnen het beeld van goed functionerende ZRA's worden grote mogelijkheden gezien op het gebied van het delen van auto's. Is dit een reële verwachting? Wat zijn de gevolgen voor de fysieke infrastructuur? En digitaal?
- Denkt u dat binnen 25 jaar, deze manier van auto bezitten een grote rol zou kunnen spelen in stedelijk Nederland?

Interactie ZRA en langzamer verkeer

- Welke maatregelen zouden ervoor kunnen zorgen dat de interactie tussen een ZRA (niet coöperatief) en ander verkeer goed verloopt? Bijvoorbeeld: persoon wilt oversteken; hoe op te lossen?

Penetratiegraden ZRA (voornamelijk uit literatuur)

- Welke verwachtingen heeft u m.b.t. de penetratiegraden van ZRA's?
- Hoe groot voorziet u de rol van gemeentes hierin?

No-regret maatregelen

Aan het eind van onderzoek worden aanbevelingen gedaan op het gebied van beleid van de infrastructuur in Enschede. Dit zijn aanbevelingen die passen binnen het huidige beleid van de gemeente maar die ook inspelen op de toekomstige ontwikkelingen van de ZRA.

- Zijn er gevolgen van de ZRA voor de infrastructuur die nu van groots belang zijn in het beleid van de gemeente? (Ruimte voor toekomstige infrastructuur in stad vrijhouden, buiten stedelijk gebied reserveren, belijningen verbeteren)
- Zijn er maatregelen binnen de infrastructuur die de gemeente op korte termijn kan nemen wanneer de gemeente de ontwikkelingen van de ZRA wenst te stimuleren?

Overig

- Vaak wordt als implicatie van de ZRA beschreven dat rijstroken smaller gemaakt kunnen worden. Is dit ook van toepassing voor binnen stedelijk gebied?

Er worden problemen voorzien in de tijd die nodig is voor een bestuurder om in te grijpen wanneer de ZRA niet meer kan functioneren.

- Is het een mogelijkheid dat zonering moet worden toegepast om het functioneren van de ZRA (level 3 SAE) veilig te maken in steden? (Bijvoorbeeld geen ZRA in binnenstad of 30 km/uur zones)
- Kunnen er andere maatregelen genomen worden om het functioneren van autonome systemen in ZRA's eenvoudiger te maken?

Ter afsluiting

- Zijn er onderwerpen, niet besproken in dit interview, die wel van belang zijn voor mijn onderzoek?
- Heeft u literatuur tot uw beschikking die nuttig kan zijn voor het onderzoek en die ik zou kunnen gebruiken?
- Hoe gaat uw bedrijf om met de grote veranderingen? Zijn daar reeds plannen voor gemaakt?
- Wat zijn de grote lijnen voor deze plannen? (Voor zover daar over gesproken mag worden)