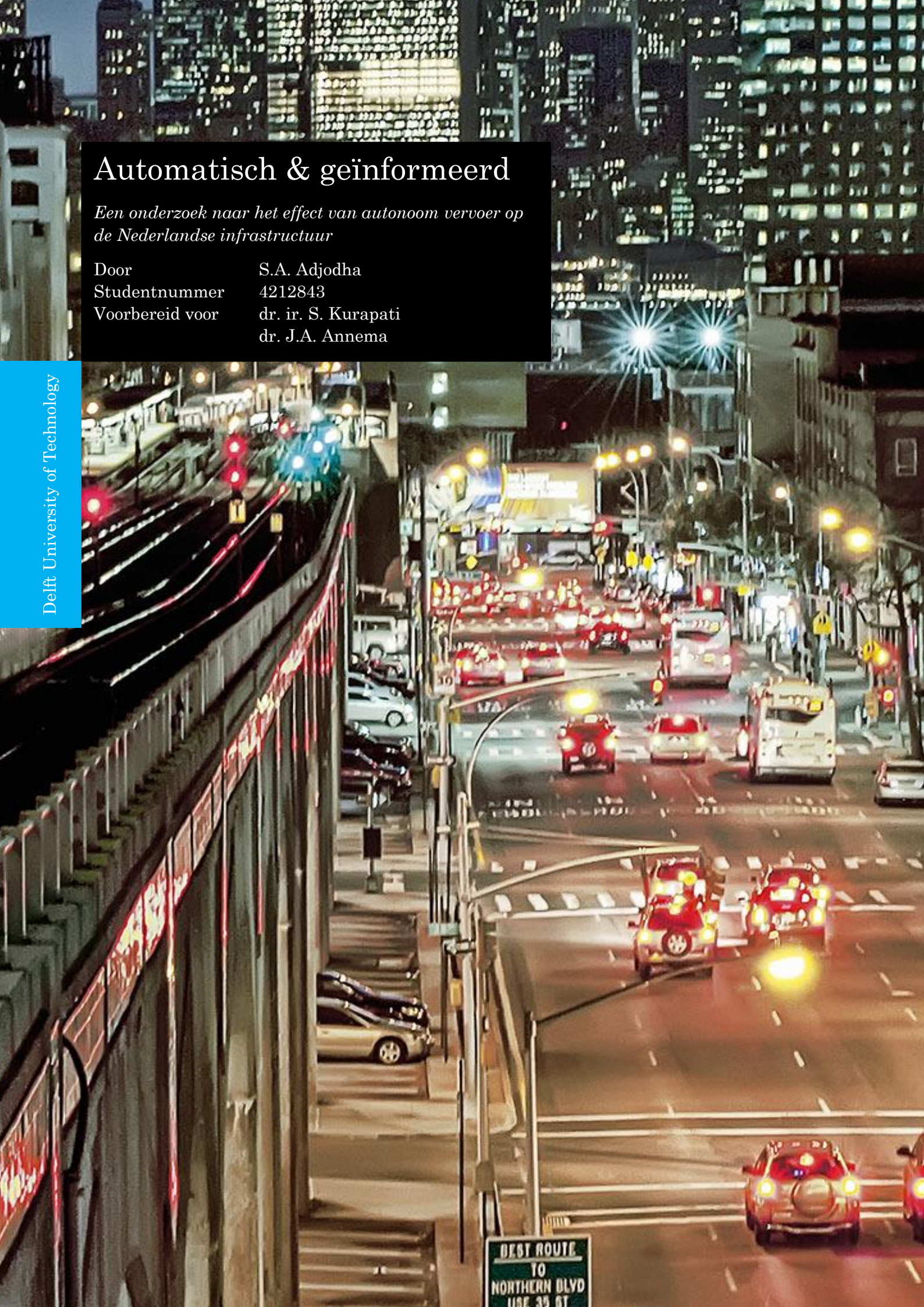


Automatisch & geïnformeerd

Een onderzoek naar het effect van autonoom vervoer op de Nederlandse infrastructuur

Door S.A. Adjodha
Studentnummer 4212843
Vorbereid voor dr. ir. S. Kurapati
dr. J.A. Annema



VOORWOORD

Voor u ligt het onderzoeksrapport ‘Automatisch & geïnformeerd’. Dit rapport is tot stand gekomen als onderdeel van het Bachelor Eind Project, ter afsluiting van de studie Technische Bestuurskunde (BSc). Het onderzoek is uitgevoerd in opdracht van Siemens Nederland N.V., in de vorm van een afstudeerstage.

Het automatisch rijden is een innovatie die mij als veelvuldig weggebruiker erg interesseert. Met die motivatie heb ik de issue paper ‘Autonoom de weg op’ geschreven, waaruit het onderzoeksvoorstel voor dit rapport naar voren is gekomen.

Ik ben dank verschuldigd aan een aantal personen, aan wie dit rapport mede te danken is.

Allereerst vanuit de TU Delft, in het bijzonder vanuit de faculteit Techniek, Bestuur en Management. Daar hebben Tineke Ruijgh-van der Ploeg als modulemanager en Shalini Kurapati als begeleidster mij bijgestaan bij het schrijven van dit rapport.

Daarnaast wil ik mijn collega’s bij Siemens ook bedanken voor de fijne samenwerking. In het bijzonder wil ik hier mijn begeleider Léon Soulier danken voor het meedenken over een onderwerp en de begeleiding tijdens mijn stage.

Ten slotte dank ik ook mijn vrienden en familie voor de steun en de motiverende, maar soms ook kritische woorden tijdens het schrijven van dit rapport.

*Sharwan Adjodha
Delft, juli 2017*

SAMENVATTING

De technologie van de zelfrijdende auto's is in potentie een 'gamechanger'. Het beeld van verkeer en vervoer dat we op dit moment kennen, kan over ongeveer twintig jaar compleet veranderd zijn met de komst van het automatisch rijden. Een productieve autoreis, minder files op de weg en een veiliger wegverkeer zijn voorbeelden van toekomstscenario's die haalbaar kunnen worden met de komst van deze nieuwe technologie. De realisatie zou het doel van het ministerie van Infrastructuur & Milieu dichterbij brengen, namelijk het wegverkeer verbeteren om Nederland veilig, leefbaar en bereikbaar te houden. Echter komen er nog onzekerheden kijken bij de ontwikkeling van automatisch rijden. Naast het feit dat de technologie nog vol in ontwikkeling is, zijn er nog vragen over het samengaan van automatisch en conventioneel vervoer en wat deze combinatie voor effect heeft op de verkeersafwikkeling.

Dit onderzoek heeft als doel een inzicht te geven in de verkeersafwikkeling bij de introductie van automatisch vervoer. Ook het onderscheiden van verschillende typen automatische voertuigen moet bijdragen aan het inzicht in de korte- en lange termijneffecten die deze nieuwe soort voertuigen met zich zullen brengen. Het coöperatief automatisch voertuig communiceert met verschillende bronnen van de infrastructuur om efficiënter te kunnen rijden, terwijl de automatische auto rijdt op basis van sensoren in en om de auto. Dit onderzoek maakt gebruik van een microscopische verkeerssimulatie om automatisch vervoer in verschillende scenario's te testen op de Nederlandse weg. Het simulatiemodel is gebaseerd op conceptuele (verkeers)modellen, zoals het fundamentele diagram van verkeersstromen, het voertuigvolg model en het vak-verander model.

Een deel van de A58 autosnelweg tussen Tilburg en Eindhoven is gemodelleerd. Deze weg heeft drie afslagen en is in beide richtingen gemodelleerd. De voertuigen zijn in vier verschillende categorieën gemodelleerd, zodat zware en snelle voertuigen onderscheiden kunnen worden van elkaar. Alle voertuigen zijn onder andere voorzien van een gewenste snelheid, gewenste volgafstand en een imperfect rijgedrag. Voor elk type voertuig wordt de gemiddelde snelheid en reistijdverlies als indicator berekend. Deze indicatoren worden ook per wegdeel en per individuele auto berekend. Historische data van de Nationale Databank Wegverkeergegevens (NDW) is gebruikt voor de validatie en verificatie van het model.

De verandering van de verkeersintensiteit bij de toelating van automatische voertuigen is afhankelijk van welk soort automatisch vervoer er op de weg komt te rijden. De reguliere automatische auto presteert slechter dan de coöperatieve versie. Het voordeel van de verschillende vormen van communicatie is in dit onderzoek van cruciaal belang gebleken om sneller te kunnen reizen over de weg. De automatische vorm zonder communicatie zorgde in een aantal runs zelfs voor meer file. Er is geen sprake van grote veranderingen in de gemiddelde snelheid na toelating van automatisch vervoer. Bij een lage intensiteit op de weg is wel te zien dat de gemiddelde snelheid stabiel rond de maximumsnelheid ligt. De automatische auto's rijden effectiever als zij daar de ruimte voor krijgen. Tijdens de spitsmomenten was dit effectieve rijgedrag minder duidelijk waarneembaar.

Een automatische rijbaan zorgt ervoor dat automatische voertuigen optimaal kunnen rijden, maar zorgt ook voor meer rijbaanverwisselingen. De coöperatief automatische auto lijdt wel tot minder vertragingen en een snellere doorstroming. Echter moet er ook vooruitgekeken worden naar de effecten van coöperatief automatisch vervoer. Als dit namelijk tot een vergroting van de verkeersvraag leidt, dan moet de komst van automatisch vervoer samengaan met andere maatregelen om het reistijdverlies te kunnen verlagen in de toekomst.

SUMMARY

The self-driving vehicle technology can be a potential game changer. The image of traffic and transport we know nowadays can change rapidly over the next twenty years with the introduction of autonomous driving. The realization of this concept can help the ministry of Infrastructure and Environment achieve their goal, which is to improve road traffic to make the Netherlands safer, more livable and more accessible. Still, there seem to be some uncertainties with the development of autonomous driving. Apart from the fact that this technology is still full in progress, there are still questions on how to combine autonomous vehicles with conventional traffic and what the effect this collaboration has on the traffic flow.

The goal of this research is to find out what effects autonomous driving can have on the traffic flows. Also, the distinguishing of autonomous driving and cooperative driving is made in this research in order to experiment with different kinds of autonomous driving. The cooperative vehicle communicates with sources of the infrastructure to drive more efficiently, while the autonomous car drives based on sensors around the car. This research uses microscopic traffic simulation to experiment with different scenarios in which autonomous driving can be introduced on the Dutch road. The simulation model is based on conceptual models of traffic, most importantly the fundamental diagram of traffic flow, the car-following model and the lane-changing model.

The A58 highway road between Tilburg and Eindhoven is built within the model. This road has three exits and is modeled in both directions. The vehicles are modeled in four different categories to divide the heavy and fast vehicles from one another. All vehicles have a desired speed, desired gap in between vehicles and driving imperfection. For each of the vehicle types a average speed and travel time loss is calculated as output. These indicators are also given per road and individual vehicle. Historical data from the Dutch Database for Road traffic data (NDW) was used for validation and verification methods.

The change in traffic intensity with the addition of autonomous vehicles is differs for both types of autonomous vehicles. The autonomous car performs worse than the cooperative version. The advantage of the different forms of communication had proved to be crucial to enable faster travelling on the roads. The autonomous car without external communication resulted in even more traffic jams in several simulation runs. The effect that have been found were not all big changes. However, the cooperative vehicles drive more effectively, especially when the intensity on the road is low.

An autonomous lane ensures that autonomous vehicles can drive optimally at the cost of more lane changes on the regular lanes. The cooperative automatic car benefits the average speed on the road and helps decreasing the travel loss time. However, the effect of cooperative driving on the traffic demand should be taken into consideration. If this new way of traveling leads to an increase in traffic demand, the arrival of autonomous driving must be combined with other alternatives to ensure travel time loss reduction in the future.

INHOUD

VOORWOORD	2
SAMENVATTING	4
SUMMARY.....	6
INHOUD	8
1 INLEIDING	10
2 METHODE.....	12
2.1 Theoretische benadering	12
2.2 Simulatietheorie	14
2.3 Keuze simulatieprogramma	14
3 MODELBESCHRIJVING	16
3.1 Conceptualisatie	16
3.2 Parameters & indicatoren	18
3.3 Datacollectie	19
3.4 Opzet experimenten	20
3.4 Opzet model	21
4 VERIFICATIE & VALIDATIE	22
4.1 Verificatie	22
4.2 Validatie	23
5 EXPERIMENTEN	24
5.1 Kenmodel.....	24
5.2 Maakmodellen	24
5.3 Resultaten.....	25
6 DISCUSSIE.....	27
6.1 Interpretatie van de resultaten.....	27
6.2 Kritische beschouwing van het model	28
7 CONCLUSIE & AANBEVELINGEN.....	29
7.1 Conclusie.....	29
7.2 Aanbevelingen	29
LITERATUUR	31
BIJLAGEN.....	34
Aannames	35
Modelopbouw	38
Verificatie & validatie.....	41

INLEIDING 1

De technologie van de zelfrijdende auto's is in potentie een 'gamechanger'. Het beeld van verkeer en vervoer dat we op dit moment kennen, kan over ongeveer twintig jaar compleet veranderd zijn met de komst van het automatisch rijden (Azmat, 2015). Een productieve autoreis, minder files op de weg en een veiliger wegverkeer zijn voorbeelden van toekomstscenario's die haalbaar kunnen worden met de komst van deze nieuwe technologie. De realisatie zou het doel van het ministerie van Infrastructuur & Milieu dichterbij brengen, namelijk het wegverkeer verbeteren om Nederland veilig, leefbaar en bereikbaar te houden (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017).

Veelvuldig onderzoek en tests naar automatisch rijden hebben geleid tot een ontwikkeling van een steeds slimmere, zelfstandigere auto. Er is nu onderscheid te maken in het niveau van zelfstandigheid van auto's, van niveau 0 (geen automatische functies) tot niveau 5 (volledige zelfrijdende auto's) (Leenaers, 2016). Op dit moment zijn auto's tot niveau 3 toegestaan op de Nederlandse wegen. Het doel is om zo snel mogelijk ook de hogere niveaus veilig en verantwoord toe te kunnen laten tot de openbare weg. Voordat dit kan gebeuren, moeten er nog onzekerheden weggenomen worden. Allereerst moeten prototypen uitvoerig getest worden om de auto's klaar te maken voor de openbare weg. Ontwikkelaars als Google, BMW en Mercedes zijn hier al uitvoerig mee bezig. Andersom moeten er ook nog onzekerheden weggenomen worden. Is de huidige infrastructuur klaar voor deze nieuwe auto's? Uit de lessons learned van het kennisjaarverslag 2016 automatisch rijden (Alkim, & Veenis, 2016) blijkt dat er uit onderzoek met betrekking tot impact veel tegensprekende uitkomsten zijn. Voorbeelden hiervan zijn de ideeën over hoe de verkeersafwikkeling te vormen en de noodzaak van een digitale infrastructuur.

De kennis betreffende het effect van automatische voertuigen op de verkeersafwikkeling kan gezien worden als beperkt om verschillende redenen. Er zijn in de literatuur simulatiemodellen gebouwd om dit effect waar te nemen, net als use cases die een aantal toekomstscenario's geschetst hebben. De discussie bij deze onderzoeken concluderen vaak hetzelfde, namelijk dat het enerzijds veel onzekerheden bevat wat betreft validiteit en anderzijds ook locatiespecifieke informatie is. Dit betekent bijvoorbeeld dat een simulatie van het verkeer in Californië (Verenigde Staten) geen conclusies biedt voor het verkeer in Nederland. Zo is het "Stay on your lane"-principe in de Verenigde Staten een gewoonte, terwijl in Nederland men links inhaalt, waar er een verbod geldt op rechts inhalen (Snelder et al., 2015). Andere onzekerheden zijn de verandering van de verkeersvraag en robuustheid van de infrastructuur, met name het nieuwe digitale infrastructuur. Hoe reageren passagiers bijvoorbeeld op het wegvallen van de techniek, waarbij de controle weer in handen komt van de bestuurder.

Onderzoek moet uitwijzen wat de effecten op korte en lange termijn zullen zijn voor de verkeersafwikkeling. Ook is het interessant om te kijken naar het huidige verkeer op de weg en hoe automatische voertuigen daar invloed op gaan hebben. Siemens (2016a) onderscheidt reguliere automatische voertuigen van de coöperatief automatische

voertuigen. Het verschil tussen deze soorten voertuigen wordt ook meegenomen in het onderzoek. Deze kennisvragen zijn samengevat tot een globale onderzoeksvraag. De onderzoeksvraag luidt als volgt:

Hoe verandert de verkeersintensiteit op een weg bij de toelating van automatische voertuigen?

Om tot een beantwoording van deze vraag te komen, zijn er een aantal deelvragen opgesteld:

Wat is het verschil in invloed tussen automatische voertuigen met verschillende vormen van communicatie?

Wat is de meest efficiënte verhouding tussen automatisch en conventioneel vervoer in een mixed traffic scenario?

In hoeverre wordt de gemiddelde snelheid verbeterd door automatisch vervoer?

In hoeverre wordt het reistijdverlies verlaagd door automatisch vervoer?

Het rapport beschrijft in het volgende hoofdstuk de onderzoeksmethode die toegepast is in dit onderzoek. Vervolgens wordt het model beschreven aan de hand van een conceptualisatie en overzicht van de gebruikte data. Daarna komt de verificatie en validatie aan bod, alvorens het experiment wordt besproken. De resultaten van het onderzoek worden kritisch bekeken in de discussie. Afsluitend is er een conclusie met aanbevelingen.

2.1 Theoretische benadering

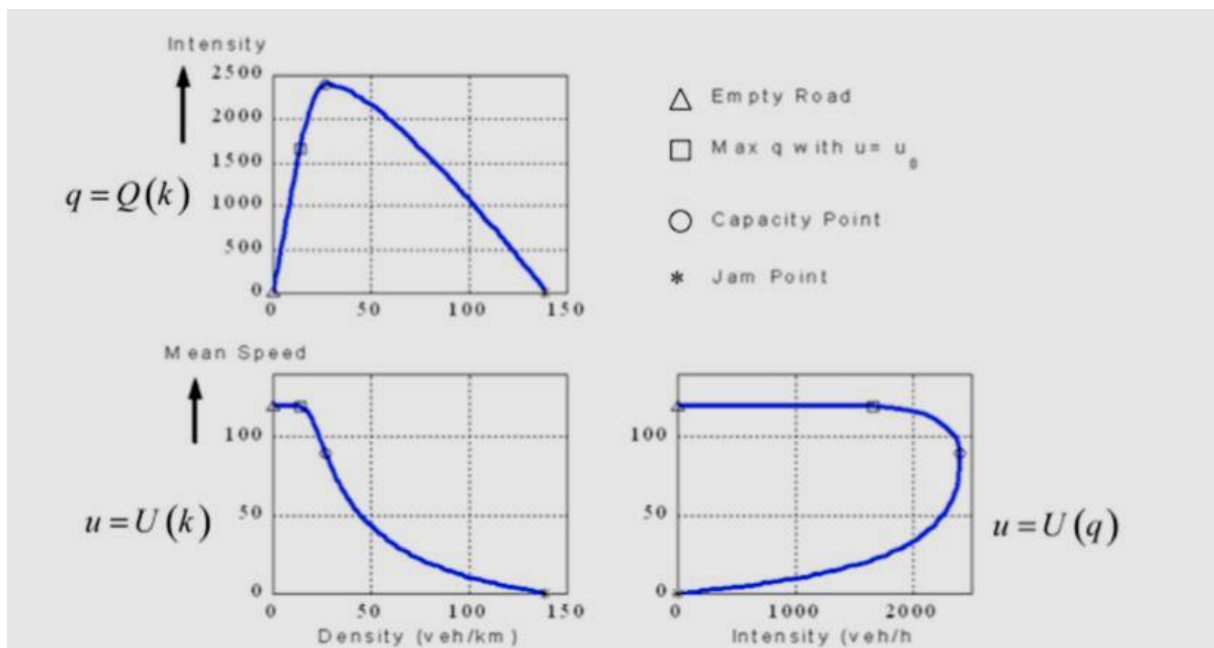
In de theoretische benadering komen een aantal modellen naar voren die aan de basis staan van de verkeerssimulatie. De complexiteit van verkeersmodellen ligt vooral in het feit dat theoretische concepten het menselijke gedrag proberen te benaderen (Maerivoet, 2001). Controle over het voertuig houden, reageren op andermans gedrag en de medische conditie zijn voorbeelden van factoren die het rijgedrag van de mens kunnen beïnvloeden.

2.1.1 Verkeersstromen

Van Nes, Wiggenraad en van Lint (2015) kenmerken de dichtheid (q), intensiteit (k) en de gemiddelde snelheid (u) als de drie belangrijkste variabelen in de verkeersstroomtheorie. In het fundamenteel diagram is te zien dat deze drie variabelen van elkaar afhankelijk zijn (zie figuur 1). Deze afhankelijk is ook te bewijzen met de zogeheten continuïteitsrelatie:

$$q = ku$$

Deze relatie staat centraal bij de berekeningen en analyses van verkeersstromen. Zo is het ontstaan van files te verklaren vanuit deze fundamentele variabelen. De capaciteit van de weg kan gezien worden als het aanbod, waar de intensiteit gezien wordt als de vraag.



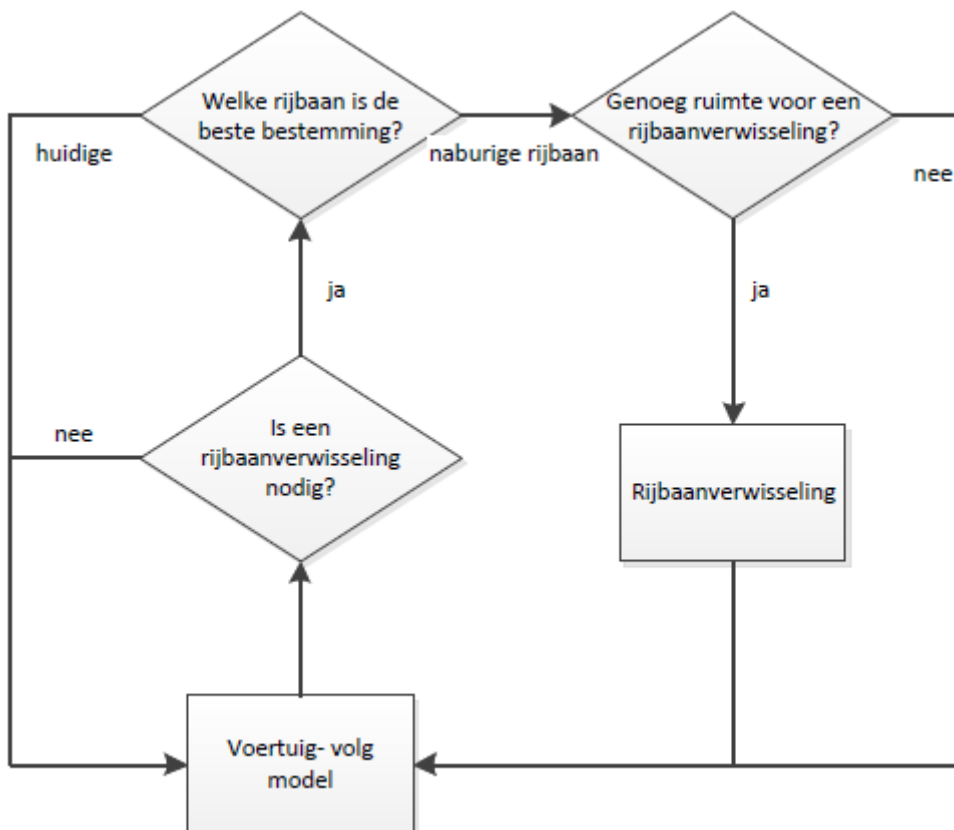
Figuur 1 Drie verschijningsvormen van het fundamenteel diagram: $q=Q(k)$, $u=U(k)$ en $u=U(q)$. (Van Nes, Wiggenraad, & van Lint, 2015).

2.1.2 Voertuig-volg modellen

Het voertuig-volg model staat aan de basis voor het simuleren van een verkeersstroom. De voertuigen berekenen aan de hand van de afstand tot het voertuig voor zich in hoeverre de snelheid aangepast moet worden. De volgafstand is een parameter die per persoon kan verschillen. De een rijdt dicht op zijn voorganger, de ander bewaart een ruime afstand. Meerdere invloeden spelen hierop een rol. Bij neerslag wordt er langzamer gereden, maar wordt er een grotere afstand bewaard (SWOV, 2012). In de simulatie wordt deze gedraging gemodelleerd met het voertuig-volg model. Er zijn meerdere versies van het model, maar in essentie hanteren deze modellen dezelfde handelingen. Een voertuig krijgt een zogeheten tussenruimte mee als parameter. Dit is de gewenste volgafstand van het voertuig. Doordat ieder voertuig zijn eigen volgafstand en snelheid heeft, ontstaan er verschillende verkeersstromen (Ahmed, 1999).

2.1.3 Vak-verander modellen

Het vak-verander model was een opvolger en aanvuller van het voertuig-volg model. De cruciale variabele hier is de versnelling van het voertuig. De versnelling maakt een onderscheid tussen twee soorten verkeersstromen, namelijk het voertuig-volg model, waarbij het voertuig de leider volgt, en de zogenaamde vrije stroom. Deze stroom houdt in dat een voertuig de gewenste snelheid van zichzelf probeert aan te houden, rekening houdend met het verkeer voor zich. Om die snelheid te behouden, is er in sommige situatie een rijbaanverandering noodzakelijk. Om dit te faciliteren is het vak-verander (beslissing)model gemaakt. Dit model baseert de keuze voor een verandering van rijbaan op drie keuzestappen (zie figuur 2).



Figuur 2 Vak-verander beslissingsmodel, gebaseerd op de theorie van Ahmed (1999).

Als deze stappen zijn doorlopen, kunnen voertuigen van rijbaan verwisselen (Ahmed, 1999). Maerivoet (2001) ziet als grote tekortkoming bij deze modellen dat deze nog niet goed het verkeer kunnen beschrijven in filesituaties. Weggebruikers veranderen hun rijgedrag in het geval van een opstopping, zowel bewust als onbewust (TNO, 2015).

2.2 Simulatietheorie

White en Ingalls (2009) zien simulatie als een experiment met een model. Het gedrag van een model imiteert het gedrag van een bepaald systeem. Modellen zijn versimpelde abstracties van een deel van een systeem en worden vaak gebruikt als veldstudies niet of moeilijk mogelijk zijn (White, & Ingalls, 2009). In dit onderzoek is dat het geval. Hoewel er veldonderzoeken met automatische voertuigen zijn gedaan, is het nog niet mogelijk om deze voertuigen op de openbare weg in Nederland met verkeer te testen. Een simulatiestudie is hier een goed alternatief voor.

Voor dit onderzoek moet het effect van automatisch rijden op de Nederlandse infrastructuur worden gesimuleerd. Kelton et al. (2011) maakte een onderscheid tussen verschillende karakteristieken van systemen om tot een geschikte simulatiemethode te komen. Deze simulatie moet op kansen zijn gebaseerd, omdat verkeersintensiteiten niet een vaste waarde hebben. Deze waarden komen voort uit gemiddelden en kansverdelingen op basis van de trends uit het verleden. Om deze redenen worden intensiteiten hier niet beschreven als een continue golf, maar juist beschreven door middel van de aankomstintensiteiten per auto (Enserink et al., 2010). De kansverdelingen zorgen ervoor dat elke run uniek is. De invoerwaarden staan niet vast en kunnen per simulatierun verschillen. Dit maakt het systeem stochastisch. Als laatste kenmerk is het systeem ook te categoriseren als een micro simulatie. SUMO is een puur micro verkeerssimulatie. Elk voertuig is specifiek beschreven aan de hand van onder andere een naam, vertrektijd en route door het systeem (Behrisch, Bieker, Erdmann, & Krajzewicz, 2011). Door op microniveau te modelleren, worden individuele voertuigen gemodelleerd die samen een verkeerssysteem zullen vormen. Bij het toevoegen van automatische voertuigen in het model kunnen de gedragingen van een individuele bestuurder zo vergeleken worden met de gedragingen van een automatisch voertuig. Macroscopische simulaties simuleren verkeer als een flow, het systeem is hier het lijdend voorwerp en niet de individuele voertuig. Helbing, Hennecke, Shvetsov, en Treiber (2002) gebruikte bij het vergelijken van micro- en macro simulaties bijvoorbeeld het macro simulatiemodel, gebaseerd op het gas-kinetische verkeersmodel.

2.3 Keuze simulatieprogramma

A. Verbraeck (persoonlijke correspondentie, 19 maart 2017) heeft een adviserende rol gehad in de keuze voor SUMO. Met de juiste programmeerkennis waren de opties voor een verkeerssimulatie OpenTrafficSim en SUMO. De keuze voor SUMO is gevallen na een testperiode van een week met beide programma's, waarbij de focus vooral lag op de haalbaarheid van het onderzoek en het gebruiksgemak van de programma's.

SUMO helpt als programma bij het onderzoeken van verschillende onderzoeks-onderwerpen, zoals routekeuze, verkeersregelingsinstallatie algoritmen en voertuig-communicatie. Het kader van dit model is hiermee ideaal voor het onderzoek naar automatische voertuigen (Behrisch et al., 2011). De open source format van SUMO zorgt ervoor dat het programma sinds 2001 regelmatig verbeterd is aan de hand van input van de gebruikers. Het programma is een verkeerssimulator die werkt op input van andere

sources. De map is gebouwd in NetEdit, onderdeel van het installatieprogramma van SUMO. De routes zijn gevormd in een Excel model met gegevens van het NDW (zie hoofdstuk 4).

W. Schakel (persoonlijke correspondentie, 13 april 2017) heeft ook geadviseerd bij de totstandkoming van dit onderzoek. De afbakening werd als belangrijk punt gezien voor de haalbaarheid van dit onderzoek in de gegeven tijdspanne. SUMO helpt hierbij met de opbouw van het model. De achterliggende algoritmen van het programma zijn vooraf al geprogrammeerd, wat het bouwen van het model vereenvoudigt. Een voorbeeld van een algoritme is het rijgedrag. Bij elke tijdstap berekent het model een nieuwe gewenste snelheid van een voertuig en past de acceleratie van het voertuig hierop aan. De acceleratie is gedurende een tijdstap constant, waardoor de positie en snelheid voor de volgende tijdstap met formules te berekenen zijn (Krajzewicz et al., 2012). Voor de positieverandering s' geldt:

$$s' = s + (v * t) + \left(\frac{a * t^2}{2} \right)$$

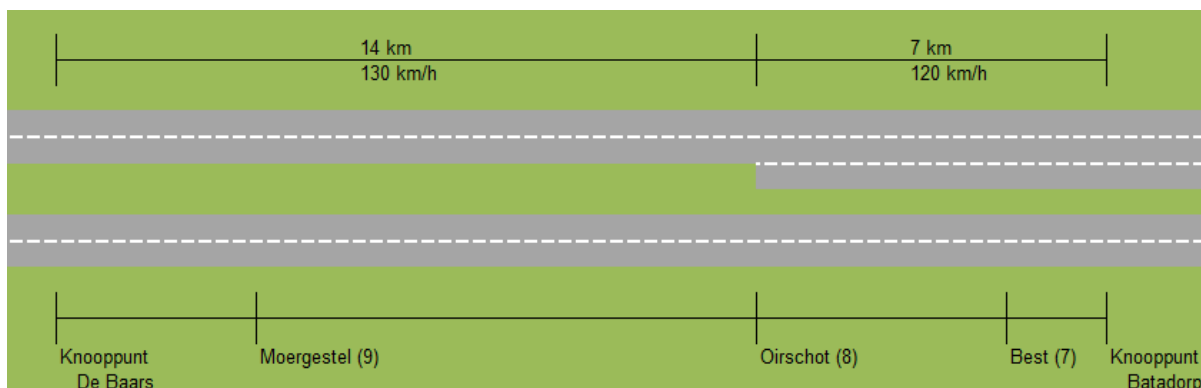
Voor de snelheidsverandering v' geldt:

$$v' = v + (a * t)$$

Deze algoritmes komen voort uit het micromodel van Stefan Krauss, het model geldt als een basis template voor SUMO (Krajzewicz et al., 2012). Op basis van dit conceptmodel is het model voor dit onderzoek opgebouwd, waarbij er rekening is gehouden met de Nederlandse wegattributen, zoals afmetingen en maximumsnelheden op de weg.

3.1 Conceptualisatie

In dit onderzoek wordt een deel van de autosnelweg A58 gesimuleerd. Het deel tussen Eindhoven en Tilburg zal voorkomen in het model. De knooppunten Batadorp en de Baars zijn het begin- en eindpunt van het model. Andere wegen zullen niet voorkomen in het model en zijn dus buiten beschouwing gelaten in dit onderzoek. Ook de afslagen zijn zogeheten ‘exits’. Deze exits zijn in werkelijkheid verbonden met doorgaande wegen, maar deze zijn niet relevant voor dit onderzoek en worden om die reden ook niet gemodelleerd. Als een voertuig een afslag neemt is de route voor die voertuig voltooid in het model. In dit model zijn er drie afslagen, namelijk Moergestel, Oirschot en Best. Er is gekozen om de weg in beide richtingen te modelleren. Dit is niet noodzakelijk, aangezien de richtingen als afzonderlijke wegen gezien kunnen worden. Echter is de configuratie van de wegen niet geheel hetzelfde en blijken beide richtingen belangrijk te zijn voor het fileprobleem, aangezien beiden een plaats hebben bemachtigd in de file top 50 van de Rijksoverheid (Rijksoverheid, 2016). Een versimpelde weergave van het te modelleren stuk weg is weergegeven in figuur 2. Naast het afbeelden van het aantal rijstroken, is de lengte van het stuk weg en de maximumsnelheid weergegeven.



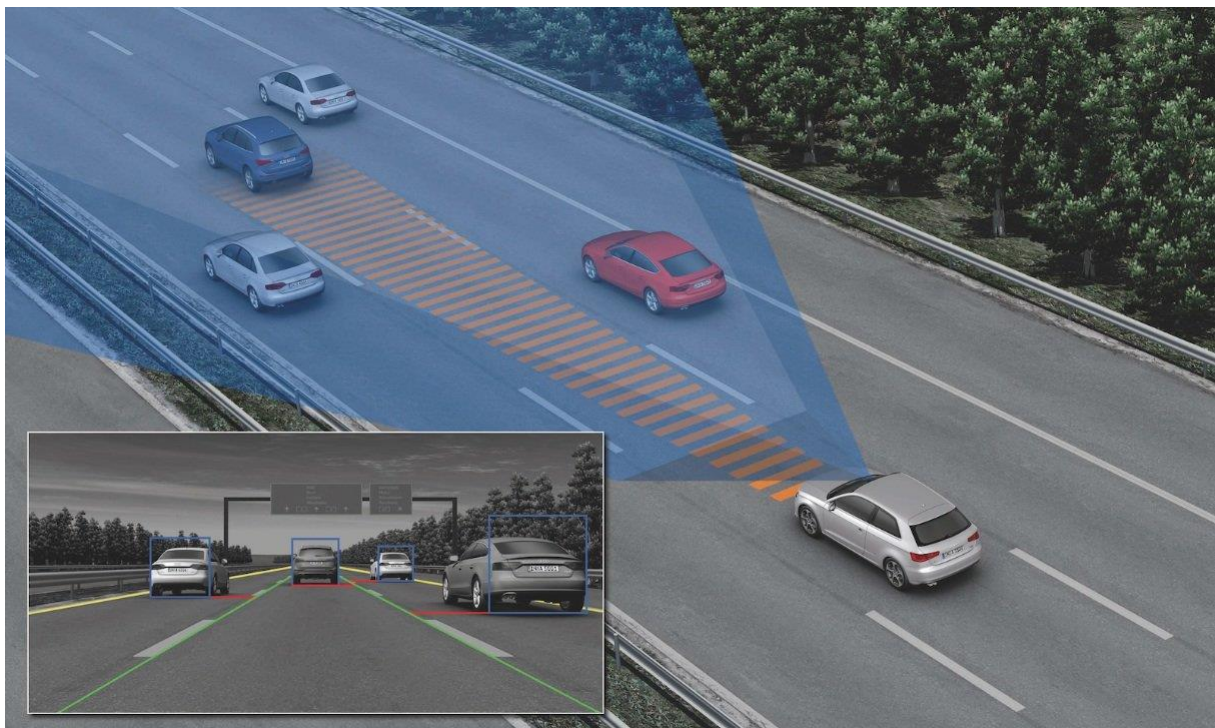
Figuur 3 Versimpelde uitbeelding van de A58 tussen knooppunten De Baars (Tilburg) en Batadorp (Eindhoven)

De voertuigen die over de weg moeten gaan rijden in het model worden gemodelleerd door het creëren van zogeheten voertuigtypen. Naast de conventionele auto worden ook lichte en zware vrachtwagens toegevoegd aan het model. Deze typen voertuigen hebben andere kenmerken, zoals de lengte en gemiddelde snelheid die deze voertuigen hebben. Ook zijn niet alle autobestuurders hetzelfde, maar is het onpraktisch om alle weggebruikers een unieke voertuigtype toe te wijzen. Wel is het mogelijk om een onderscheid te maken tussen twee soorten weggebruikers. Het SWOV onderzocht hardrijders op de Nederlandse weg en concludeerde dat 30% van de weggebruikers te hard rijdt over een significante stuk van de reis (SWOV, 2016). De grootte van dit aandeel maakt het noodzakelijk om een type auto te maken die harder dan gemiddeld rijdt. Zo zijn er in het kenmodel vier typen voertuigen te onderscheiden die toegelaten

worden op de weg. In het maakmodel wordt nog een van beide type automatische auto's toegevoegd aan het verkeer.

Voor het simuleren van een automatisch voertuig is gebruik gemaakt van eerdere modelstudies. Wagner (2016) modelleerde automatische voertuigen als een auto met andere parameterwaarden. De volgtijd en sigma kregen waarden die de automatische voertuigen onderscheiden van het conventionele verkeer. Sigma staat in SUMO voor de optimale rijstijl van een voertuig. Een lagere sigma waarde staat voor een betere rijstijl. In dit onderzoek is er een onderscheidt gemaakt tussen automatische en coöperatief automatische voertuigen. Timmer en Kool (2014) maakte eenzelfde soort onderscheiding. De 'regulier' automatische auto rijdt op sensoren en maakt gebruik van de informatie die het op de weg vergaard. Er wordt afstand bewaard met het conventionele verkeer om op tijd op gedragingen te kunnen anticiperen (Timmer, & Kool, 2014).

Naast deze automatische voertuig is er ook een autonominiveau waarbij er gecommuniceerd wordt met de wegwijkant en gebruik gemaakt wordt van route-informatie. Deze zogenaamde coöperatieve auto's verschillen van de automatische auto's, doordat zij juist dichter op voorliggers rijden en een efficiëntere rijstijl hebben door de extra informatie die zij verkrijgen (Siemens, 2016a). Deze informatie verkrijgen de voertuigen via Intelligente Transport Systemen (ITS). Deze systemen maken coöperatieve auto's flexibeler en dynamischer in het wegverkeer en passen de voertuigen aan op basis van actuele omstandigheden (SWOV, 2010).



Figuur 1 Adaptive Cruise Control met radar sensoren. Geraadpleegd op crankydriver.com/word/what-the-hell-is-adaptive-cruise-control/

3.2 Parameters & indicatoren

Om tot de beantwoording van de deelvragen te komen, worden de resultaten van experimenten met het model gebruikt. Deze resultaten komen voort uit invoervariabelen die in het model worden toegepast. Het model verwerkt deze invoervariabelen en produceert hiermee uitvoervariabelen. Het interpreteren van deze uitvoervariabelen leidt tot de gevraagde resultaten. De invoervariabelen zijn vooral gericht op de voertuigtypen. Daarnaast zijn er ook nog de intensiteiten per route van ieder type voertuig. Deze intensiteiten zijn geen gemiddelde waarden, maar een distributie die voortkomt uit data uit de praktijk. Met behulp van werkelijke data en stat:fit is er naar een verdeling gezocht. Uit de analyse is naar voren gekomen dat de intensiteit per uur zich het best meet aan een Poisson kans distributie. De voertuigen zijn gedefinieerd met een aantal parameterwaarden. Deze waarden vormen de basis voor de gedragingen van de voertuigen en onderscheiden deze van elkaar. De invoervariabelen behoren tot een van de volgende groepen:

- Snelheid
- Volgafstand
- Route
- Intensiteit
- Wegcapaciteit
- Aantal rijstroken
- Maximumsnelheid

De uitvoervariabelen zijn afhankelijk van de data die SUMO aanlevert aan het einde van de modelrun. Per tijdstap levert SUMO de gereden snelheid voor elk voertuig individueel. Naast de snelheid laat het programma ook zien wat de locatie van het voertuig, zodat de snelheid en verplaatsing over tijd terug te vinden zijn. De volgende uitvoervariabelen worden gebruikt:

- Gemiddelde snelheid van een voertuig(type)
- Gemiddelde snelheid gereden op een weggedeelte
- Gemiddelde verplaatsingstijd per voertuigtype
- Gemiddelde verplaatsingstijd per route

Er wordt gewerkt met gemiddelden om runs snel en overzichtelijk met elkaar te kunnen vergelijken. Ook kunnen scenario's naast elkaar gezet worden en kan er een conclusie gegeven worden op basis van gereden snelheid en verplaatsingstijd. Een bijkomend voordeel is dat er actuele gegevens beschikbaar zijn van deze variabelen. Dit maakt het valideren van de gegevens ook praktischer. Het doel is om de gemiddelde snelheid van de voertuigen te optimaliseren. Door per weggedeelte naar de gemiddelde snelheid te kijken, zijn de knelpunten van de weg goed te identificeren. De gegevens per voertuigtype laten onder anderen zien welke type automatische auto het beste doorstroomt in het verkeer. De gemiddelde verplaatsingstijd per route geeft de mogelijkheid om bestemmingsverkeer en doorgaand verkeer van elkaar te scheiden.

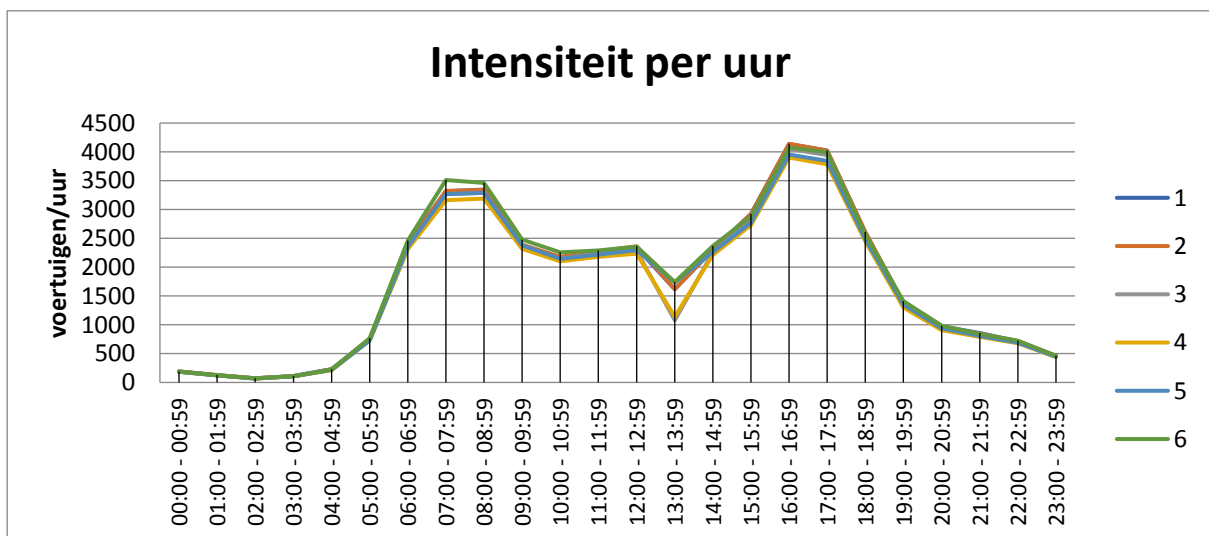
3.3 Datacollectie

Voor het bouwen van het model zijn er een aantal gegevens nodig om het model te laten overeenkomen met het conceptuele model. Het opbouwen van het model ging met behulp van data van de Rijksoverheid. De A58 autosnelweg staat onder het beheer van diezelfde Rijksoverheid en de gevonden waarden zijn gevalideerd met digitale mappen en een praktische testrit over de A58.

Het simulatiemodel moet met behulp van realistische data tot nuttige resultaten kunnen komen, die van toepassing zijn op het wegennet in Nederland. De data daarvoor volgt uit literatuurstudies, waaronder use cases die vooraf zijn gegaan aan dit onderzoek. Ook vanuit Siemens Nederland wordt er data geleverd, vooral met betrekking tot simulatiewaarden en gegevens over Intelligente Transport Systemen.

De aankomstintensiteiten vanuit de opritten wordt gegenereerd met gegevens vanuit het NDW. NDW staat voor Nationale Databank Wegverkeergegevens. Het is een initiatief van wegbeheerders in Nederland, die gezamenlijk data inwinnen en deze vrijgeven (NDW, 2017). Het opvragen van data gaat via een zelf gemaakte module, waarbij de gebruiker zelf meetpunten en periodes kan kiezen. De dataset is echter wel gelimiteerd tot 10 meetpunten per aanvraag. Ook is er een maximum in aantal aanvragen per dag. De resultaten uit dit onderzoek worden ook met data van het NDW gevalideerd, door de intensiteiten in het model te vergelijken met werkelijke data op de weg. Na deze validatie zijn er scenario's in het model gecreëerd, bijvoorbeeld door automatische voertuigen toe te voegen aan het verkeer in combinatie met de mate van informatie waarover de voertuigen beschikken. In het model zijn er twee soorten automatische voertuigen gecreëerd. Een voertuig die puur op sensoren rijdt en een coöperatieve soort die meer communiceert de omgeving.

Het NDW levert een standaard Excel bestand met de aangevraagde intensiteiten. Door enkele bewerkingen in Excel zijn de gegevens bruikbaar gemaakt voor het model in SUMO. De intensiteiten van elk meetpunten wordt voor een etmaal geleverd. Daarnaast wordt deze intensiteit ook per uur weergegeven. Door deze data voor verschillende meetpunten op te vragen, is het mogelijk om een algemene verdeling te ontdekken in de intensiteiten. Figuur 3 laat twee duidelijke piekmomenten zien.



Figuur 4 Intensiteiten per uur op zes meetpunten gedurende 24 uur (NDW, 2017)

Deze piekmomenten zijn bekend als de ochtend- en avondspits, waar de intensiteiten het hoogst liggen.

3.4 Opzet experimenten

Met de data en het model staat alles klaar om te gaan experimenteren. Naast het kenmodel worden er ook maakmodellen gemaakt om vier nieuwe scenario's te simuleren. De maakmodellen verschillen van het kenmodel, namelijk met de toevoeging van een nieuw soort voertuigtype. Hieronder volgt een korte beschrijving van de scenario's met een verwachting van het resultaat.

Scenario 1: Introductie van de automatische auto

De 'regulier' automatische auto doet zijn intrede tot de openbare weg in Nederland. De automatische auto die op basis van sensoren rijdt komt conventionele voertuigen vervangen in verschillende aandelen. Er wordt gevarieerd in een aandeel automatische voertuigen van 10 tot 50% van het aantal auto's op de weg. Dit type moet zich aanpassen aan handmatig bestuurde voertuigen, waardoor zij een grotere volgafstand zullen hanteren. De verwachting hier is dat dit type automatische auto minder effectief zal zijn dan de coöperatief automatische auto.

Scenario 2: Introductie van de coöperatief automatische auto

Ditmaal is het niet de automatische auto, maar de coöperatief automatische auto die als vervanging wordt toegevoegd aan het systeem. De rest van het scenario is te vergelijken met scenario 1. De coöperatief automatische auto kan gezien worden als de verbeterde automatische auto. Er is sprake van een betere reactietijd door het bezit van reisinformatie en onderlinge communicatie. Dit heeft tot gevolg dat deze type voertuigen een relatief zeer korte volgafstand hanteren. De verwachting in dit scenario is dan ook dat het toevoegen van coöperatieve autonomie leidt tot betere resultaten op de weg.

Scenario 3: Automatische baan op de snelweg

In dit scenario komt er op een deel van de weg een rijbaan waar enkel de automatische auto op mag rijden. Dit zorgt ervoor dat automatische voertuigen met een hogere snelheid en kortere volgtijden kunnen rijden door de afwezigheid van handmatig bestuurde voertuigen. Dit betekent echter ook dat de capaciteit op de totale weg omlaag gaat, aangezien er een rijbaan deels wegvalt. De automatische voertuigen zijn niet verplicht om op deze baan te rijden. Op de rustige tijdstippen zullen deze auto's dus alsnog op de reguliere rijbaan rijden. De verwachting is dat vooral de automatische voertuigen profijt zullen hebben van de rijbaan, vooral in de spitsuren, waar zij waarschijnlijk minder vertraging zullen ervaren.

Scenario 4: Meer verkeer door verplaatsing van OV naar shared autogebruik

In dit scenario wordt het aandeel automatische voertuigen niet genomen als vervanging van conventioneel verkeer. Tillema et al. (2015) beschreven al meerdere scenario's waarbij de komst van automatisch rijdende auto's kunnen leiden tot gedeeld autogebruik. Hierbij wordt de komst van de automatische auto niet gezien als vervanging van het conventionele autoverkeer, maar juist als vervanging van het openbaar vervoer in de huidige vorm. In dit scenario zal de verkeersvraag toenemen door de toevoeging van het automatische verkeer. De verwachting is dat de verhoogde vraag tot meer congestie zal leiden, ondanks de voordelen van het coöperatief automatisch rijden.

3.4 Opzet model

Voordat er simulaties gedraaid kunnen worden, moeten een aantal keuzes gemaakt worden wat betreft simulatietijd. Allereerst moet gekeken worden hoelang één simulatierun duurt. Bij de experimenten is ervoor gekozen om één dag te simuleren. Ten behoeve van de validatie is er gekozen voor de maandag. Hoewel intensiteiten per dag kunnen verschillen, is er een gelijke distributie te vinden in het aantal voertuigen per uur over een dag.

Vanwege het feit dat er 24/7 voertuigen op de weg aanwezig kunnen zijn, beschrijft dit model een niet-eindigend systeem. Een niet-eindigend systeem moet een zogeheten steady state bereiken alvorens er relevante resultaten gevonden kunnen worden. Om de steady state van het model te bereiken, is er een opwarmtijd nodig. Tijdens deze opwarmtijd draait het model, maar worden de resultaten in deze tijdsperiode niet meegenomen. Na het draaien van een volledige dag kan het model resultaten leveren die relevant kunnen zijn. De totale runlengte van de simulatie komt dan op twee dagen, één dag opwarmtijd plus één dag simulatietijd.

Ten slotte moet er ook rekening gehouden worden met het soort variabelen waarmee gewerkt wordt. De toevoeging van de distributie in voertuigintensiteiten maakt het model afhankelijk van stochastische waarden. Dit maakt iedere run uniek en zorgt er ook voor dat er in een run extreme waarden voor kunnen komen. Het draaien van meerdere replicaties zorgt ervoor dat er met 95% zekerheid gesteld kan worden dat de uitkomsten binnen een bepaald interval liggen. In het ideale geval worden er zoveel mogelijk replicaties uitgevoerd. Echter moet er ook rekening gehouden worden met de tijdsperiode van het onderzoek en mogelijkheden van de hardware waarop de experimenten gedraaid zullen worden. Uiteindelijk is ervoor gekozen om dertig runs per experiment te draaien.

% AV's	Scenario					<i>Totaal</i>
	0	1	2	3	4	
huidige situatie	30	0	0	0	0	<i>30</i>
10%	0	30	30	30	30	<i>120</i>
20%	0	30	30	30	30	<i>120</i>
30%	0	30	30	30	30	<i>120</i>
40%	0	30	30	30	30	<i>120</i>
50%	0	30	30	30	30	<i>120</i>
<i>Totaal</i>	<i>30</i>	<i>150</i>	<i>150</i>	<i>150</i>	<i>150</i>	<i>630</i>

Figuur 5 Overzicht van het aantal replicaties van het experiment

4

VERIFICATIE & VALIDATIE

Het beschreven model wordt aan de hand van de verificatie en validatie gecontroleerd op correctheid. Er wordt gekeken of het systeem juist gerepresenteerd wordt door het model. Ook wordt er gecontroleerd of de verkregen waarden uit het model representatief zijn voor de werkelijkheid. Een volledige weergave van de analyses is terug te vinden in bijlage III.

4.1 Verificatie

De verificatie dient als controle voor de vertaling van conceptuele modellen naar het simulatiemodel. De gebruikte distributies en modelstructuur zijn hier van belang. Deze worden gecontroleerd aan de hand van de verkregen uitvoervariabelen. Door een voertuig met een vaste route door het systeem te laten rijden, kan geobserveerd worden of het model de juiste handelingen uitvoert. Door enkel de route van Moergestel naar Oirschot te voorzien van een voertuigdistributie, moet blijken of het model ook daadwerkelijk alleen op die route voertuigen produceert en verwerkt. Uit de observaties en resultaten blijkt dat er in de rest van het model geen activiteit heeft plaatsgevonden.

De handelingen worden samen met een expert op het gebied van verkeer gecontroleerd. De diensten van Eddy Verhoeven, werkzaam bij Siemens Nederland N.V. zijn hiervoor gevraagd. Stapsgewijs is het model doorgenomen om te controleren of alle relevante factoren van het verkeerssysteem zijn meegenomen en correct vertaald zijn vanuit de conceptuele modellen.

De distributie van de intensiteiten op de weg zijn ook meegenomen in de verificatie. De aantallen per uur zijn vergeleken met werkelijke aantallen op dinsdag 21 maart 2017. Deze datum is willekeurig gekozen, echter is er wel bewust voor een dinsdag gekozen. De dinsdag is gemiddeld genomen de op een na drukste dag van de week op de weg. Aan de hand van de student t-toets zijn de waarden van het model met de werkelijke waarden vergeleken. Er is gekeken naar de verdeling van de voertuigtypen. Uit deze test blijkt dat de waarden uit het model niet significant verschillen met de werkelijke aantallen. Dit betekent dat de resultaten uit het model representatief zijn voor het verkeer op maandag 21 maart 2017. Er zijn enkele kleine verschillen te ontdekken (zie figuur 5)

Voertuigtype	Aandeel werkelijk	Aandeel in model	Vershil	p-waarde
Normale auto	60,38%	60,41%	0.03%	0,314
Snelle auto	25,88%	25,84%	-0,04%	0,303
Lichte vrachtwagen	4,19%	4,17%	0,02%	0,132
Zware vrachtwagen	9,57%	9,55%	-0,02%	0,479

Figuur 6 Verificatie van de verdeling voertuigtypen

4.2 Validatie

De validatie van het model omvat het vergelijken van het model met het werkelijke systeem. De vraag hier is of het correcte model gebouwd is. Er is een onderscheid te maken tussen een operationele en een structurele validatie. Bij de operationele validatie worden de uitvoervariabelen vergeleken met data uit de praktijk. De structurele validatie focust zich op de gedragingen van het model. Aan de hand van de gemiddeld gereden snelheid op zes meetpunten worden de resultaten gevalideerd. De gegevens uit het model zijn in het programma SPSS geanalyseerd aan de hand van een student t-test.

Meetpunt NDW	Meetpunt model	Gemeten waarde op 21-03-17	Gemiddelde waarde uit het model	Vershil	p-waarde
Eastbound hmp 17.0	gneE20E	106,54	98,05	-8,49	0,000
Eastbound hmp 26.3	gneE13,0E	101,08	101,23	0,15	0,805
Eastbound hmp 30.3	gneE8,0E	97,17	75,39	-21,78	0,000
Westbound hmp 17.0	gneE20W	105,92	106,89	0,97	0,129
Westbound hmp 26.4	gneE13,0W	106,42	96,55	-9,87	0,000
Westbound hmp 30.3	gneE8,0W	105,38	108,37	2,99	0,001

Figuur 7 Validatie van de gemiddelde snelheid

Ook hier is Eddy Verhoeven (persoonlijke correspondentie, 30 juni 2017) gevraagd het model te observeren om de gedragingen te controleren. De verdeling van het verkeer over de dag verloopt naar wens, de spitsmomenten laten zich duidelijk zien. Ook het ontstaan van files gebeurt op een realistische manier. Vooral het inefficiënt invoegen bij handmatig bestuurde voertuigen valt op. Dit is een van de veroorzakers van files bij invoegstroken (Filedier Verkeersonderneming, 2014). Een onrealistische gedraging is die van het verkeer op de linkerbaan. Daar is nog te vaak een vrachtwagen aan te treffen op de linkerbaan, meer dan valt op te maken uit de historische data van de NDW (respectievelijk 4,5 % tegenover 1,5%). Een kalibratie van de parameterwaarden van de voertuigtypen lichte en zware vrachtwagens zou dit probleem op kunnen lossen. Dit is vanwege het kleine effect dat deze gedraging meebrengt en de tijdsdruk achterwege gelaten.

Tot slot wordt ook de robuustheid van het model getest. Dit wordt gedaan met een zogeheten sensitivity analyse. In deze analyse wordt de werking van het systeem gecontroleerd aan de hand van extreme waarden. Zo zijn er bijvoorbeeld extreem veel auto's het model ingestuurd om te observeren wat er gebeurt. Te zien is dat er vrij snel een file ontstaat, die niet zich moeilijk laat oplossen. Dit laat zien dat het model correct werkt met extreme waarden, aangezien de intensiteit van het aantal voertuigen de capaciteit van de weg ver overstijgt. In het andere uiterste geval wordt er gekeken of het model zich correct gedraagt bij een intensiteit van één auto. Het model maakt een auto aan die ook de juiste route rijdt. Ter controle is er ook gekeken of de andere wegen daadwerkelijk leeg zijn gebleven, wat het geval was.

EXPERIMENTEN 5

Het model is aan de hand van verschillende technieken gecontroleerd en vergeleken met het daadwerkelijke systeem. Nadat gecontroleerd is of het systeem correct wordt gerepresenteerd door het kenmodel, kunnen er met behulp van aanpassingen aan het model nieuwe scenario's getest worden. Aan de hand van de opzet beschreven in hoofdstuk 3 worden de nieuwe scenario's getest in het model.

5.1 Kenmodel

Het kenmodel is een representatie van de huidige situatie. Het experimenteren met het kenmodel resulteert in nulwaarden. Deze waarden worden afgezet tegen de resultaten van de verschillende scenario's om zinnige conclusies te kunnen trekken.

5.2 Maakmodellen

De volgende scenario's zijn gecreëerd:

- Scenario 1: Introductie van de automatische auto
- Scenario 2: Introductie van de coöperatief automatische auto
- Scenario 3: Automatische baan op de snelweg
- Scenario 4: Meer verkeer door verplaatsing van OV naar shared autogebruik

De twee typen automatische voertuigen wisselen elkaar per scenario af. In scenario 0 (kenmodel) zal geen van beide voorkomen in het model. Dit omdat er in de huidige situatie ook nog geen volledig automatische voertuigen mogen rijden op de openbare weg. In de scenario's 1 en 3 zal de regulier automatische auto toegevoegd worden aan het verkeer. In scenario's 2 en 4 zal er gemodelleerd worden met de coöperatief automatische auto. Elk scenario (kenmodel uitgezonderd) wordt met vijf verschillende configuraties uitgevoerd (zie figuur 7). Hierbij verandert het aandeel automatische voertuigen dat in het model aanwezig zal zijn.

Aandeel AV's	Scenario				
	0	1	2	3	4
0%	0	nvt	nvt	nvt	nvt
10%	nvt	1.1	2.1	3.1	4.1
20%	nvt	1.2	2.2	3.2	4.2
30%	nvt	1.3	2.3	3.3	4.3
40%	nvt	1.4	2.4	3.4	4.4
50%	nvt	1.5	2.5	3.5	4.5

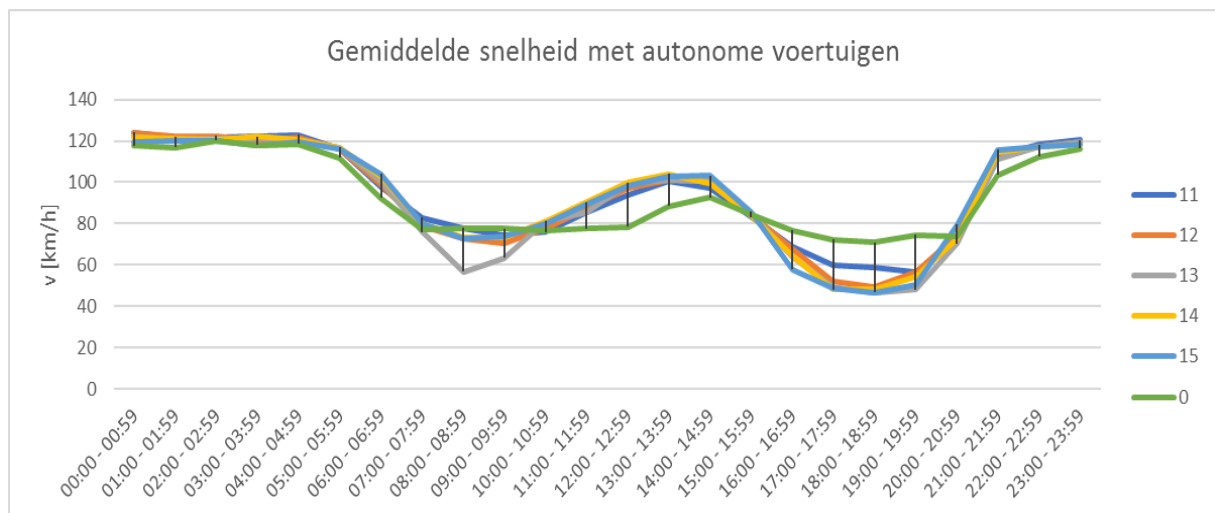
Figuur 8 Overzicht van alle scenario's

5.3 Resultaten

De resultaten van het experiment zullen per scenario gepresenteerd worden. Elk scenario wordt kort beschreven, waarna de relevante resultaten beschreven worden. Sommige resultaten zullen, waar het noodzakelijk wordt geacht, geïllustreerd worden in de vorm van grafieken en/of tabellen.

5.3.1 Scenario 1

Bij de toelating van automatische voertuigen was de verwachting dat er minder file zou ontstaan. Uit de resultaten van de simulatie blijkt deze verandering niet te komen. Sterker nog, er is een kleine stijging in het reistijdverlies waar te nemen. Ook de gemiddelde snelheid gaat omlaag, voornamelijk in de avondspits (zie figuur 8).



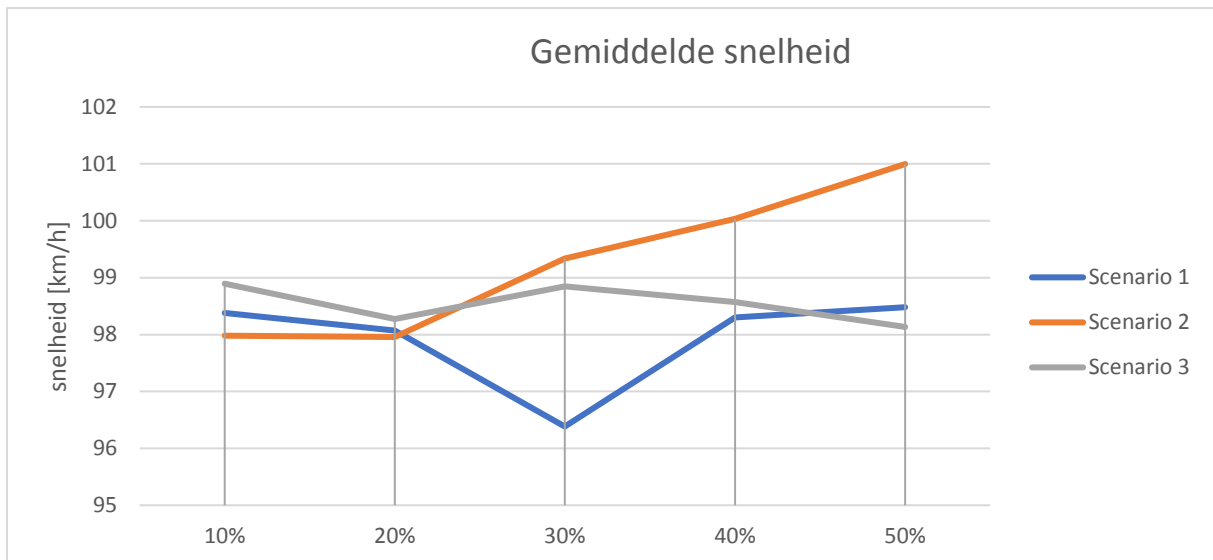
Figuur 9 Gemiddelde snelheid over een dag bij de toelating van autonome voertuigen

5.3.2 Scenario 2

Bij de toelating van het coöperatief automatisch vervoer is wel een positief resultaat te zien. Hoewel er ook in dit scenario geen duidelijk verschil is in de gemiddelde snelheid over de dag, is er minder reistijdverlies waarneembaar. De daling in reistijdverlies vertaald zich ook in de structurele stijging van de gemiddelde snelheid over de zes meetpunten waarmee het model gevalideerd is (zie figuur 10).

5.3.3 Scenario 3

Bij de automatische baan is er een verbetering in de gemiddeld gereden snelheid aanwezig. Deze winst daalt echter aanzienlijk als het aandeel automatisch vervoer stijgt (zie figuur 9). Ook het reistijdverlies neemt niet af, deze neemt sterk toe bij een groot aandeel automatische voertuigen. Het aantal rijbaanverwisselingen neemt in dit scenario met 8% toe ten opzichte van de overige scenario's.



Figuur 10 Gemiddelde snelheid per scenario

5.3.4 Scenario 4

Het laatste scenario is uitgelopen op een chaotische weg. Een toename van 10% van de verkeersvraag lijkt de weg nog aan te kunnen, hoewel het voordeel van de coöperatief automatische auto weg is genomen. Bij een grotere toename loopt het model vol en zijn er grote reistijdverliesuren. De avondspits lost bij de laatste twee scenario's niet op.

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de experimenten kritisch bekeken. Er wordt gekeken naar de waarden en de betekenis achter deze gevonden waarden. Zo wordt er gelet op representativiteit en op de beperkingen van het model. Het resultaat hiervan moet leiden tot het trekken van zinnige conclusies en het maken van aanbevelingen.

6.1 Interpretatie van de resultaten

In het vorige hoofdstuk zijn de resultaten gepresenteerd. In het eerste scenario leidde de toelating van de automatische voertuigen tot meer reistijdverlies en lagere snelheden. Dit ligt niet in de lijn der verwachting, daar de technologie vol in ontwikkeling is om het wegverkeer te verbeteren. Eddy Verhoeven (persoonlijke correspondentie, 30 juni 2017) had wel een gelijke verwachting van het model. Zijn verklaring voor dit resultaat is dat de volgtijd over de tijd een belangrijke factor is. Hij stelt dat het harmonica-effect van optrekkende voertuigen niet verdwijnt met de komst van automatische voertuigen, doordat deze voertuigen te veel rekening moeten houden met de auto die zij volgen. Als deze auto handmatig bestuurd wordt, dan moet de automatische auto meegaan met zijn gedragingen. Bij het coöperatief automatisch verkeer zijn er wel duidelijke verschillen te ontdekken in vergelijking met de huidige situatie. De veranderingen zijn in dit scenario positief. Minder reistijdverlies en een gemiddeld snellere autoreis zijn, ook in kleine stijgingen, een goed middel om het wegverkeer te verbeteren. Een verklaring voor de mindere resultaten kunnen de gebruikte parameterwaarden zijn. Deze onderscheiden de automatische voertuigen van de handmatig bestuurde voertuigen, maar dit effect zorgt dus niet voor een extreem verschil. De grotere volgafstand die de automatische auto gebruikt heeft in negatief opzicht een sterker effect dan het voordeel van het rijgedrag van een automatisch voertuig. De coöperatieve toevoeging haalt dit negatieve effect weg, waardoor er wel een voordeel behaalt kan worden met automatisch verkeer. Volgens Timmer en Kool (2014) groeit het besef dat coöperatieve systemen van cruciaal belang zijn voor het werkend maken van een efficiënter automatische voertuig.

De automatische rijbaan leidt niet tot verbeteringen. Bij een lage intensiteit op de weg is er een voordeel voor de automatische voertuigen, maar bij een hoge intensiteit valt dit effect volledig weg en is er sneller sprake van opstopping. De automatische voertuigen kunnen vlotter doorrijden, maar op de gewone weg ontstaat er sneller een opstopping. Ook moet er in de file meer van baan gewisseld worden, omdat automatische voertuigen van de automatische baan naar een afrit moeten. Deze acties zorgen ook voor een grotere vertraging. In dit onderzoek is er voor een automatische baan gekozen aan de linkerkant van de weg. Die keuze is gemaakt na een aantal proefsimulaties met verschillende automatische banen. Uiteindelijk is er gekozen voor het alternatief waarbij er het minst aantal rijbaanverwisselingen is waargenomen. ANWB (z.j.) concludeerde uit haar ledenonderzoek dat het in- en uitvoeg verkeer door 20% van de ondervraagden gezien wordt als een oorzaak van opstoppingen en files bij zogeheten vrachtwagencolones. Deze ontstaan door vrachtwagens die over langere tijd kort achter elkaar rijden. Dit is vergelijkbaar met de automatische baan, waar er ook colones van automatische

voertuigen ontstaat. Uit de resultaten is gebleken dat het aantal rijbaanverwisselingen met 8% toeneemt in een simulatie met een automatische rijbaan.

Het laatste scenario laat zien dat een vergroting van de vraag niet geheel opgevangen kan worden door de komst van automatische voertuigen. De coöperatief automatische auto kan een groei tot 10% compenseren. Als de vraag verder groeit, loopt de weg nog sneller vol dan in de huidige situatie. Uit het scenario met een groei van 10% autoverkeer blijkt dat de capaciteit van de weg kan groeien met de komst van coöperatief automatische voertuigen. Deze groei is echter niet bestand tegen een nog grotere groei in de verkeersvraag. Bij het scenario met 20% groei is al te zien dat het voordeel dat het coöperatief automatisch voertuig met zich mee brengt, weg is gevallen tegen de vergrote dichtheid op de weg. Een nog grotere groei versterkt dit effect. Rijkswaterstaat (2014) ziet de mobiliteitsvraag in de toekomst groeien. Tot en met 2021 wordt de verwachte groei van het wegverkeer slechts voor een deel opgevangen door een uitbreiding van de wegcapaciteit. Het reistijdverlies kan hierdoor in totaal toenemen met 38% in vergelijking met 2015 (KiM, 2016).

6.2 Kritische beschouwing van het model

Het model is in een redelijk korte tijd opgebouwd. Het programma SUMO moest aangeleerd worden om het model in een paar weken tijd te laten werken. Logischerwijs zijn er nog steeds op- en aanmerkingen op het model. Verder onderzoek kan hiermee het model verbeteren en dit moet leiden tot betere modellen in toekomstige simulatiestudies.

Het model laat vrachtwagens nog te vaak rijden op de linkerbaan. Het model simuleert gedrag voor elk type voertuig hetzelfde, terwijl uit de data blijkt dat verschillende types zich ook verschillend gedragen. Zo is 99% van al het verkeer op de linkerbaan een normale auto, volgens data van de NDW. Dit tegenover 86% op de rechterbaan. De vrachtwagens bevinden zich dus vooral op de rechterbaan in de realiteit, iets wat dus ook in het model terug zou moeten te zien zijn.

Ook de manier van uitvoegen roept op dit moment nog vragen op. Meestal verloopt dit proces realistisch, maar er zijn situaties geobserveerd waarbij het voertuig in het model op het einde van de uitrit wacht op een hiaat om uit te voegen. Dit is een actie die op de weg niet gebruikelijk is en niet voorkomt in reguliere situaties.

De verkregen data is actueel en volledig, maar niet voldoende om een volledig OD-matrix te maken. Meetpunten ontbreken hiervoor en ook is het niet bekend wat de bestemming van een voertuig is. Om dit op te lossen is er van de aanwezige data en inwonersaantallen gebruik gemaakt om de verhoudingen tussen de bestemmingen weer te geven. Deze verhoudingen zijn gebruikt om de bestemming te bepalen van alle voertuigen. Hoewel dit niet altijd zal kloppen, is het voor dit onderzoek wel als beste oplossing gebleken om de resultaten te valideren en om een realistische route verdeling te genereren.

In dit hoofdstuk wordt er teruggeblikt naar het doel en vragen van dit onderzoek. De resultaten en interpretaties uit de voorgaande hoofdstukken worden meegenomen in de beantwoording van de vragen en bij het maken van aanbevelingen.

7.1 Conclusie

Dit onderzoek heeft als doel een inzicht te geven in de verkeersafwikkeling bij de introductie van automatisch vervoer. Ook het onderscheiden van verschillende typen automatische voertuigen moet bijdragen aan het inzicht in de korte- en lange termijneffecten die deze nieuwe soort voertuigen met zich zullen brengen. Met de beantwoording van de volgende vragen is getracht dit doel te behalen.

Hoe verandert de verkeersintensiteit op een weg bij de toelating van automatische voertuigen?

De verandering van de verkeersintensiteit bij de toelating van automatische voertuigen is afhankelijk van welk soort automatisch vervoer er op de weg komt te rijden. De reguliere automatische auto presteert slechter dan de coöperatieve versie. Het voordeel van de verschillende vormen van communicatie is in dit onderzoek van cruciaal belang gebleken om sneller te kunnen reizen over de weg. De automatische vorm zonder communicatie zorgde in een aantal runs zelfs voor meer file. Er is geen sprake van grote veranderingen in de gemiddelde snelheid na toelating van automatisch vervoer. Bij een lage intensiteit op de weg is wel te zien dat de gemiddelde snelheid stabiel rond de maximumsnelheid ligt. De automatische auto's rijden effectiever als zij daar de ruimte voor krijgen. Tijdens de spitsmomenten was dit effectieve rijgedrag minder duidelijk waarneembaar.

Een automatische rijbaan zorgt ervoor dat automatische voertuigen optimaal kunnen rijden, maar zorgt ook voor meer rijbaanverwisselingen. De coöperatief automatische auto lijdt wel tot minder vertragingen en een snellere doorstroming. Echter moet er ook vooruitgekeken worden naar de effecten van coöperatief automatisch vervoer. Als dit namelijk tot een vergroting van de verkeersvraag leidt, dan moet de komst van automatisch vervoer samengaan met andere maatregelen om het reistijdverlies te kunnen verlagen in de toekomst.

7.2 Aanbevelingen

Een aanbeveling voor de toekomst is het juist kalibreren van de parameterwaarden en modellen die gebruikt worden bij verkeerssimulaties. Het steeds verbeteren van voertuig-volg modellen en vak-verander modellen moet leiden tot een representatieve simulatie. Vooral gedragingen van weggebruikers lijkt een factor die moeilijk te modelleren is. Ook het meenemen van omgevingsfactoren, zoals het weer en de stand van de zon over de dag, kan leiden tot een verkeerssimulatie die dichter bij de realiteit staat dan nu het geval is. Filedier Verkeersonderneming (2014) vond een aantal oorzaken die vaak niet terug te vinden zijn in verkeerssimulaties. Voorbeelden zijn

kijkfiles bij ongelukken op de tegengestelde rijbaan en het laten ontstaan van grote hiaten in de file.

Op de lange termijn moet er onderzoek gedaan worden op basis van veldtesten. Coöperatief automatisch vervoer komt uit dit onderzoek als beste variant van het automatisch rijden. Om deze variant te faciliteren moet er een digitale infrastructuur ontwikkeld worden (Siemens, 2016a). Hoe dit gefaciliteerd moet worden en door wie zijn belangrijke onzekerheden die weggenomen dienen te worden voordat er coöperatief kan worden gereden. Een andere aanbeveling voor onderzoek op de lange termijn is het vergelijken van alternatieven voor het vergroten van de wegcapaciteit. Het effect van een wegverbreding op de capaciteit van de weg is misschien minder sterk dan het effect van coöperatief automatische voertuigen. Naast een betere benutting van de weg, zorgt de komst van deze nieuwe voertuigen er ook voor dat de autoreis efficiënter benut kan worden. Dit biedt openingen voor onder andere het rijden buiten de spits.

LITERATUUR

- Ahmed, K. I. (1999). *Modeling drivers' acceleration and lane changing behavior* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology). Geraadpleegd op <https://dspace.mit.edu/>
- Alkim, T., & Veenis, J. (2016). *Kennisjaarverslag 2016 automatisch rijden IMPACT* [PowerPoint slides]. Geraadpleegd op <http://knowledgeagenda.connekt.nl/impact/>
- ANWB. (z.j.). *Resultaten onderzoek 'veilig tussen de vrachtwagens door'* [Persbericht]. Geraadpleegd op <https://www.anwb.nl/belangenbehartiging/verkeer/>
- Azmat, M. (2015). Impact of autonomous vehicles on urban mobility. *Schriftenreihe des Instituts für Transportwirtschaft und Logistik - Verkehr*, 01/2015. Institut für Transportwirtschaft und Logistik, WU Wien, Wenen. (Unpublished). Geraadpleegd op <http://epub.wu.ac.at/4633/>
- Behrisch, M., Bieker, L., Erdmann, J., & Krajzewicz, D. (2011). SUMO—simulation of urban mobility: an overview. In *Proceedings of SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation*. ThinkMind.
- Enserink, B., Hermans, L., Kwakkel, J., Thissen, W., Koppenjan, J., & Bots, P. (2010). *Policy analysis of multi-actor systems* (1st ed.). The Hague: Lemma.
- Filedier Verkeersonderneming. (2014, 7 mei). Over rijgedrag en files: de fileprofessor legt uit. *Filedier*. Geraadpleegd op <http://www.filedier.nl/wielen/de-fileprofessor/>
- Helbing, D., Hennecke, A., Shvetsov, V., & Treiber, M. (2002). Micro-and macro-simulation of freeway traffic. *Mathematical and computer modelling*, 35(5-6), 517-547.
- KiM. (2016). *Mobiliteitsbeeld 2016*. Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM).
- Krajzewicz, D., Erdmann, J., Behrisch, M., & Bieker, L. (2012). Recent development and applications of SUMO-Simulation of Urban MObility. *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, 5(3&4).
- Krauß, S. (1998). *Microscopic modeling of traffic flow: Investigation of collision free vehicle dynamics* (Doctoral dissertation).
- Kyriakidis, M., Happee, R., & de Winter, J. C. (2015). Public opinion on automated driving: results of an international questionnaire among 5000 respondents. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 32, 127-140.
- Maerivoet, S. (2001). *Het gebruik van microscopische verkeerssimulatie bij een onderzoek naar de fileproblematiek op de Antwerpse ring* (Proefschrift). Geraadpleegd op www.maerivoet.org/website/traffic/publications/resources/thesis.pdf

- Milakis, D., Snelder, M., van Arem, B., van Wee, B., & Correia, G. (2017). Development and transport implications of automated vehicles in the Netherlands: scenarios for 2030 and 2050. *European Journal Of Transport And Infrastructure Research*, 17(1), 63-85. Geraadpleegd op <http://tlo.tbm.tudelft.nl/ejtir>
- Ministerie van IenM. (2017). *Beter Benutten: Incidenten* (Factsheet Platform Beter Benutten). Geraadpleegd op <http://www.beterbenutten.nl/incidenten>
- Morley, K. (2017, 9 februari). Driverless car owners will need ‘two-in-one’ insurance policies under new Government plans. *The Telegraph*. Geraadpleegd op <http://www.telegraph.co.uk/>
- NDW. (2017). *Over ons*. Geraadpleegd op <http://www.ndw.nu/>
- Rijksoverheid. (z.j.). *Wet aansprakelijkheidsverzekering motorrijtuigen* [Database]. Geraadpleegd op <http://wetten.overheid.nl/BWBR0002415/2016-01-01>
- Rijksoverheid. (2016). *File top 50*. Geraadpleegd op <http://mirt2016.mirtoverzicht.nl>
- Rijkswaterstaat. (2016). *Jaarbericht Rijkswaterstaat 2015*. Geraadpleegd op <https://www.rijkswaterstaat.nl/over-ons/onze-organisatie/jaarbericht>
- Rijkswaterstaat. (2017). *Publieksrapportage Rijkswegennet Jaaroverzicht 2016*. Geraadpleegd op <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2017/02/14/publieksrapportage-rijkswegennet-jaaroverzicht-2016>
- Schakel, W.J. (2015). *Development, simulation and evaluation of in-car advice on headway, speed and lane* (Proefschrift). Geraadpleegd op <http://repository.tudelft.nl>
- Siemens. (2015a). *‘Alleen met coöperatieve systemen vlottere doorstroming’*. Siemens Nederland. Geraadpleegd op <https://mobilitymatters.siemens.nl/>
- Siemens. (2015b). *De meerwaarde van ‘talking traffic’*. Siemens Nederland. Geraadpleegd op <https://mobilitymatters.siemens.nl/>
- Siemens. (2016a). *Coöperatieve mobiliteit: kansen en keuzes* [Whitepaper]. Siemens Nederland. Geraadpleegd op <https://mobilitymatters.siemens.nl/>
- Siemens. (2016b). *Samenwerking cruciaal in doorontwikkeling ITS*. Siemens MobilityMatters. Geraadpleegd op <https://mobilitymatters.siemens.nl>
- Snelder, M., van Arem, B., Hoogendoorn, R., van Nes, R. (2015). *Methodische verkenning zelfrijdende auto's en bereikbaarheid*. Geraadpleegd op TU Delft repository <https://repository.tudelft.nl/>
- Specification. (2017). In *SUMO User Documentation*. Geraadpleegd op 29 mei 2017, op <http://sumo.dlr.de/wiki/Specification>
- SWOV (2010). *Intelligente Transportsystemen (ITS) en verkeersveiligheid*. SWOV-factsheet, juli 2010. SWOV, Leidschendam.
- SWOV (2012). *De invloed van het weer op de verkeersveiligheid*. SWOV-Factsheet, februari 2012. SWOV, Leidschendam. Geraadpleegd op <https://www.swov.nl/feiten-cijfers/factsheet/de-invloed-van-het-weer-op-de-verkeersveiligheid>

- SWOV (2016). *Snelheid en snelheidsmanagement*. SWOV-factsheet, november 2016, Den Haag.
- Tillema, T., Berveling, J., Gelauff, G., Waard, J., Harms, L., & Derriks, H. (2015). *Chauffeur aan het stuur?* Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM).
- Timmer, J., & Kool, L. (2014). *Tem de robotauto, De zelfsturende auto voor publieke doelen*. Den Haag: Rathenau Instituut.
- TNO. (2015). *Beïnvloeden van rijgedrag ter bevordering van de doorstroming op de A20* (TNO-rapport 2015 R10827). Geraadpleegd op <http://publications.tno.nl>
- van Koningsbruggen, P. (2015). De verborgen complexiteit van automatische voertuigen. *NM Magazine*, 2015(1). Geraadpleegd op <http://www.nm-magazine.nl/artikelen/de-verborgen-complexiteit-van-automatische-voertuigen/>
- van Nes, R., Wiggenraad, P.B.L., & van Lint, J.W.C. (2015). *Dictaat CTB 1420-14 Transport & Planning*. Faculteit Civiel Techniek en Geowetenschappen, TU Delft.
- van Vugt, T. (2016, 25 december). Zelfrijdende auto heeft veel impact op verzekeraar. *Am:web*. Geraadpleegd op <http://www.amweb.nl/>
- Verrips A.S., & Hoen, A. (2016). *Kansrijk mobiliteitsbeleid*. Den Haag: Centraal Planbureau en Planbureau voor de Leefomgeving. Geraadpleegd op www.pbl.nl
- Wagner, P. (2016). Traffic Control and Traffic Management in a Transportation System with Autonomous Vehicles. *Autonomous Driving*, 301-316. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-48847-8_15

BIJLAGEN

In de modelbeschrijving komen er een aantal aannames naar voren die zijn gemaakt om het model valide en werkend te krijgen. Deze aannames zijn onder andere gemaakt doordat het simuleren beperkingen met zich meebrengt en door ontbrekende data. Deze aannames zorgen er ook voor dat het systeem afgebakend wordt. Hieronder volgt een overzicht van de aannames uit de modelbeschrijving, ditmaal gedetailleerder beschreven:

Aanname 1: Intensiteitsverdeling

De verdeling die het aantal voertuigen per uur in het model bepaald is opgebouwd vanuit werkelijke data. Met het programma `stat:fit` is er onderzocht welk soort verdeling de intensiteit op de weg het dichtst benaderde. Na een eerste analyse bleek er geen representatieve verdeling beschikbaar te zijn voor de intensiteit. De intensiteit is dan ook een uitzonderlijke verdeling, mede door de twee pieken die de ochtend- en avondspits representeren. Om toch tot een verdeling te komen, is er niet naar de intensiteit van 24 uur gekeken, maar zijn de intensiteiten per uur onderzocht. Hier kwamen wel verdelingen voor ieder uur uit. Een Poisson verdeling lijkt de intensiteit per uur het dichtst te benaderen.

Aanname 2: Ontbrekende data

Hoewel er dankzij het NDW-informatie beschikbaar is over de intensiteit en gemiddelde snelheid op de Nederlandse wegen, is er toch nog sprake van ontbrekende data. Zo is het niet mogelijk om een vertrek-bestemmings (origin-destination) matrix te maken met de gegevens die beschikbaar zijn. Dit komt omdat de meetpunten enkel het aantal voertuigen meet die het punt passeren. Het is niet mogelijk om de bestemming van het voertuig te bepalen. Daarvoor zou bijvoorbeeld de bestuurder naar de kant gehaald moeten worden om ondervraagd te worden. Dit is niet haalbaar en onpraktisch, waardoor de bestemmingen op basis van verschillen in de meetpunten en percentages geschat is. Zo is er bij een afslag een meetpunt voor de afslag, tussen de af- en oprit en na de afslag. Hierdoor kan berekend worden hoeveel voertuigen de weg verlaten en hoeveel voertuigen de weg betreden. De meetpunten meten echter niet 100% accuraat het aantal voertuigen, waardoor er verschillen ontstaan. Ook mist er bij de afslag Best een meetpunt tussen de op- en afrit, waardoor er niet bekend is hoeveel de voertuigen bij deze afslag afslaan of erbij komen. Deze ontbrekende data wordt vervangen door schattingen op basis van inwonersaantallen. De inwonersaantallen van Oirschot en Best zijn bij het Centraal Bureau voor Statistiek (CBS) opgehaald. De waarden van afslag Oirschot zijn naar inwoners geschaald naar Best. Hierna is deze verhouding weer geschaald naar het werkelijk gemeten verschil voor en na afslag Best (zie figuur 1). Met deze geschatte waarden is het O/D-matrix gecomplementeerd (zie figuur 2).

Inwoners Oirschot	18.538
Inwoners Best	29.375
Bijkomend verkeer vanuit Oirschot	2.379
Afslaand verkeer bij Oirschot	6.968
Vershil voor en na Oirschot	4.607
Bijkomend verkeer vanuit Best	3.666
Afslaand verkeer bij Best	10.767
Vershil voor en na Best	7.101

Figuur 11 Verdeling intensiteiten afslag Best

	De Baars	Moergestel	Oirschot	Best	Batadorp
De Baars		2.165	2.229	2.919	34.145
Moergestel	2.964		149	196	2.296
Oirschot	2.869	157		550	6.436
Best	2.999	164	446		10.767
Batadorp	36.842	2.026	5.479	11.166	

Figuur 12 Origin/Destination matrix, gebaseerd op cijfers van het NDW betreffende 21 maart 2017

Aanname 3: Weersituatie niet meegenomen

In het simulatiemodel is er geen rekening gehouden met weersomstandigheden. Dit is nochtans wel een belangrijke factor in het verkeerssysteem. Zo wijzen cijfers van SWOV (2012) erop dat er meer file is bij neerslag. Het optimaliseren van de parameters bij wijzigende weersomstandigheden bleek echter zeer complex en zou een veel groter model moeten omvatten. Ook is het nog relatief onbekend hoe (en überhaupt of) automatische voertuigen reageren en werken tijdens extreme weersomstandigheden. Bij verdere ontwikkelingen binnen dit domein is onderzoek hiernaar wel gewenst.

Aanname 4: Gebruikte conceptmodellen

De car-following- en lane-changing modellen zijn gekozen op basis van beschikbaarheid, gebruiksgemak in SUMO en actualiteit. SUMO werkt met een aantal conceptmodellen die vooraf al in het programma gecodeerd zijn. Daardoor werd de keuze beperkt tot een van de modellen die standaard beschikbaar zijn gesteld door SUMO. Uiteindelijk is er gekozen voor de meest actuele en tevens meest gebruikte conceptmodellen. Deze modellen hebben als voordeel dat zij regelmatig zijn verbeterd met behulp van updates. Bij verder onderzoek zou er geëxperimenteerd kunnen worden met de verschillende conceptmodellen, om de resultaten met elkaar te kunnen vergelijken en een meer onderbouwde aanbeveling te maken.

Conclusie

Na alle tekortkomingen en gemaakte aannames te hebben beschouwd, kan gesteld worden dat het simulatiemodel nog in haar kinderschoenen staat. In een tijdspanne van tien weken is er een model gebouwd, wat relatief simpel een beeld geeft van het verkeerssysteem van de A58. Relatief simpel wilt niet zeggen dat het model niet

bruikbaar is. Met de gemaakte aannames in acht genomen, kunnen er concrete aanbevelingen gemaakt worden. Ook kan het model gebruikt worden in verder onderzoek. Door de simpele benadering is het model snel te begrijpen en is het gebruiksgemak hoog. Het verder detailleren van conceptmodellen en het verder analyseren van de gebruikte parameters kan leiden tot een model dat de realiteit nog dichter benaderd. Uiteindelijk zullen veldstudies toch nodig zijn om de nieuwe technologie te onderzoeken op de openbare weg. Microsimulaties zijn een goede tool om de realiteit te benaderen, maar zal deze niet geheel kunnen vervangen.

SUMO is een verzameling aan programma's die bijdragen aan het bouwen van een verkeerssimulatiemodel. In het installatiepakket zijn een aantal programma's geschreven die de gebruiker verschillende opties geven, zoals het willekeurig creëren van intensiteiten en routes. Ook vooraf geprogrammeerde algoritmen en parameters zijn aanwezig. Hoewel een aantal programma's geschreven zijn in python, wordt het simulatiemodel gecodeerd in C++.

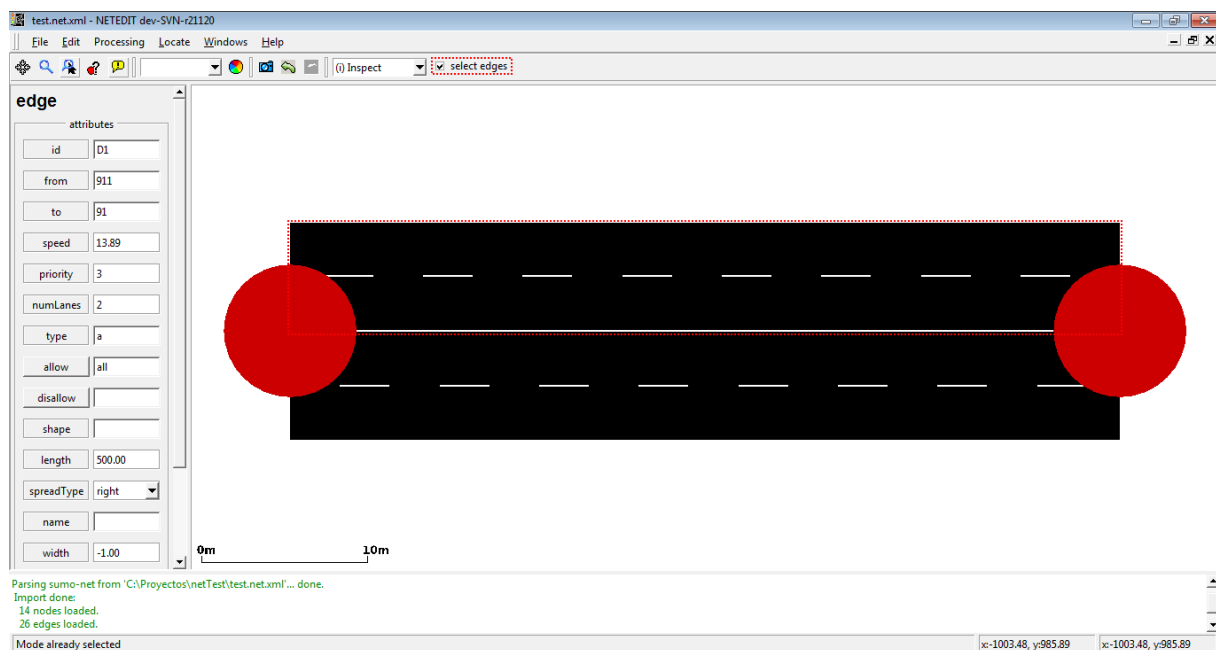
Het model wordt gevormd door een zogenaamde configuratiefile. De configuratie wordt gevormd door vier componenten:

- Input
- Output
- Tijd
- Report

Hieronder worden de vier componenten verder beschreven.

Input

De input van de configuratiefile bestaat op zichzelf weer uit drie bestanden. Deze bestanden worden uitgelezen en vormen samen het simulatiemodel. Als eerst is er de net-file. Deze file beschrijft de weg en bijbehorende karakteristieken van de weg. Dit kan gedaan worden door handmatig de code te schrijven, maar SUMO levert ook een programma waarmee er visueel een weg gebouwd kan worden, genaamd NetEdit. De wegen kunnen hierin getekend worden en de karakteristieken van de weg kunnen toegevoegd worden aan de wegen. Ook de verbindingen tussen de wegen kunnen gebouwd worden, waardoor er gemakkelijk op- en afritten gecreëerd kunnen worden.



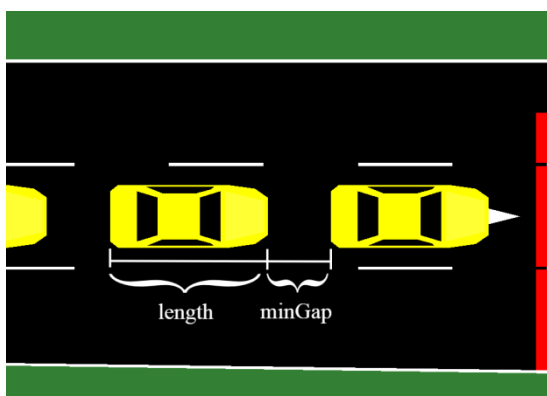
Figuur 13 NetEdit view van een stuk weg, met links de karakteristieken

Nadat de weg gebouwd is, worden er voertuigen gemaakt die over de weg kunnen rijden. Dit wordt in de route-file gedaan. Als eerste worden er voertuigtypen gedefinieerd. In het kenmodel is er een onderscheid gemaakt tussen een viertal voertuigtypen. In de scenario's wordt hier telkens een automatische type aan toegevoegd. De typen worden gecreëerd aan de hand van een bepaalde kansverdeling. Deze verdeling is gemaakt met behulp van realistische data van het NDW. Het daadwerkelijke aantal voertuigen dat op de weg zal rijden wordt later gedefinieerd bij de flows. Naast een naam, worden de voertuigtypen gedefinieerd aan de hand van een aantal parameters. Deze parameters definiëren de gedragingen van de weggebruikers en onderscheiden ze van elkaar.

vType id	vClass	maxSpeed	speedFactor	speedDev	sigma	minGap	tau	color
normal car	passenger	50	1.0	0.2	0.5	2.5	1	yellow
sparty car	passenger	60	1.3	0.1	0.2	1.5	1	yellow
trailer	trailer	30	0.8	0.1	0.5	3.0	1	yellow
truck	truck	30	0.9	0.1	0.5	3.0	1	yellow
automated car	passenger	40	1.0	0.0	0.0	3.5	1	red
cooperative car	passenger	40	1.0	0.0	0.0	1.0	0.5	blue

Figuur 14 Parameterwaarden van de verschillende voertuigtypen

- vType id Naam van het type voertuig
- vClass Inhoud van het voertuig, niet van belang in dit onderzoek
- maxSpeed De maximum snelheid van het voertuig (in m/s)
- speedFactor De verwachte vermenigvuldigingfactor die het type voertuig gebruikt voor de maximumsnelheid van de weg (normaal verdeeld)
- speedDev Standaarddeviatie van de speedFactor
- sigma De imperfectiefactor van de bestuurder, bepaalt in welke mate de bestuurder zich houdt aan de principes van het car-following model (stochast)
- minGap Ruimte tussen twee opeenvolgende voertuigen (in m, zie figuur 5)
- tau De gewenste volgtijd van de bestuurder, bepaalt in hoeverre de bestuurder tevreden is met de volgtijd tot het voertuig voor zich
- color Kleur van het voertuig, vooral gebruikt om automatische voertuigen te onderscheiden van het overige verkeer



Figuur 15 Definitie van de minGap, de ruimte tussen twee opeenvolgende voertuigen

De gedefinieerde voertuigtypen krijgen ten slotte nog een route toegewezen vanuit de route-file. Alle mogelijke routes op de weg zijn vooraf genoteerd en krijgen een intensiteit toegewezen. Deze intensiteit bepaalt hoeveel voertuigen deze route rijden en dit is een aanname op zich. Het is namelijk in de werkelijke data onbekend wat de

bestemming van de voertuigen is. Dit zou enkel gemeten kunnen worden door voertuigen te stoppen en bestuurders naar hun bestemming te vragen. Er is getracht een bestemmingsverdeling te maken op basis van intensiteitsverschillen voor, tussen en na een afslag. Dit kan een goede manier zijn, echter mist er data, omdat afslag Best geen meetpunt heeft tussen de op- en afrit. Het is dus onduidelijk hoeveel voertuigen bij deze afslag uit het systeem gaan en hoeveel erbij komen. Hiervoor is een schatting gemaakt. Met de routes gecodeerd, is het nu mogelijk om simulaties te draaien.

Als laatste file van de input is er nog de additional-files. Het woord additional verklapt al dat deze file niet kritiek is voor de werking van het model. Deze file zorgt ervoor dat er bepaalde output-files gecreëerd worden door SUMO. Eigenlijk behoort deze file dus bij de output, maar SUMO heeft het in de code geplaatst bij de input omdat deze files afhankelijk zijn van de net- en route-files.

Output

De output files worden automatisch aangemaakt door SUMO. Het zijn vooraf gedefinieerde indicatoren, waarbij er enkel een naam gevraagd wordt. Door gestructureerde namen te gebruiken, zijn de output files van alle runs simpel terug te vinden. De summary file geeft voor elke tijdstap aan hoeveel voertuigen er gecreëerd zijn en zijn toegevoegd aan het model. Daarnaast wordt ook de tijd bijgehouden die een voertuig in het model doorbrengt, waardoor de gemiddelde reistijd per tijdstap weergegeven kan worden. Dit wordt echter niet als indicator gebruikt in het onderzoek, het aantal voertuigen over de tijd is wel van belang om de intensiteit te kunnen valideren.

De filezwaarte wordt berekend met de queue time outputfile. Deze file beschrijft per tijdstap op welke rijbaan er een wachtrij is ontstaan. De wachttijd en lengte van de wachtrij zijn de indicatoren die zijn gegeven. In Excel worden deze waarden met elkaar vermenigvuldigd om tot de filezwaarte te komen.

Ten slotte is het reistijdverlies te berekenen met de tripinfos outputfile. Deze file beschrijft indicatoren die gebruikt kunnen worden om de gemiddelde snelheid en het reistijdverlies te berekenen. Het reistijdverlies is het verschil tussen de werkelijke reistijd en de reistijd bij 100 km/uur van alle weggebruikers. De verliesuren van alle weggebruikers worden samengenomen tot het totale reistijdverlies, uitgedrukt in voertuigverliesuren (Rijkswaterstaat, 2017).

Tijd

De tijd van de simulatie wordt hier aangegeven. Dit is niet noodzakelijk als er in de SUMOgui wordt gesimuleerd, omdat men in dit programma de simulatie handmatig kan stoppen. Door het grote aantal replicaties is het echter gewenst om in Windows command line te simuleren. Hierbij is het niet mogelijk om observaties te maken, maar de simulatie voltrekt zich wel sneller. De tijd wordt met een begin en eindwaarde gedefinieerd. De tijd in SUMO gaat in tijdstappen van een seconde (kan ook gewijzigd worden) en daarmee staat een simulatie van 172.800 stappen voor twee dagen simulatietijd. Het experiment maakt gebruik van een opwarmtijd van één dag.

Report

Deze laatste component is niet van belang voor het onderzoek, maar zijn standaardwaarden van SUMO.

Om de resultaten van het experiment een betekenis te kunnen geven, moet er onderzocht worden welke conclusies er getrokken kunnen worden. Door middel van een verificatie en validatie van het model kan er onderzocht worden wat de resultaten betekenen voor het werkelijke systeem.

Verificatie

De gebruikte verdelingen in het model zullen geverifieerd worden aan de hand van data van het NDW. Het eerste proces is de intensiteit op de weg. De werkelijke data van 21 maart 2017 is gebruikt om een verdeling te creëren. Deze verdeling is in het model gebruikt en aan de hand van een verificatie van de 30 simulatieruns zal gekeken worden of de verdeling zorgt voor een representatieve simulatie. Hierna zal ook de verdeling van de typen auto's geverifieerd worden.

Structuurvergelijking met Eddy Verhoeven (Siemens)

Samen met Eddy Verhoeven van Siemens is het model en de opbouw van het model in stappen doorlopen. Hierbij lag de nadruk op de conceptuele modellen en de vertaling hiervan in het model....

Validatie

Replicatieve validatie

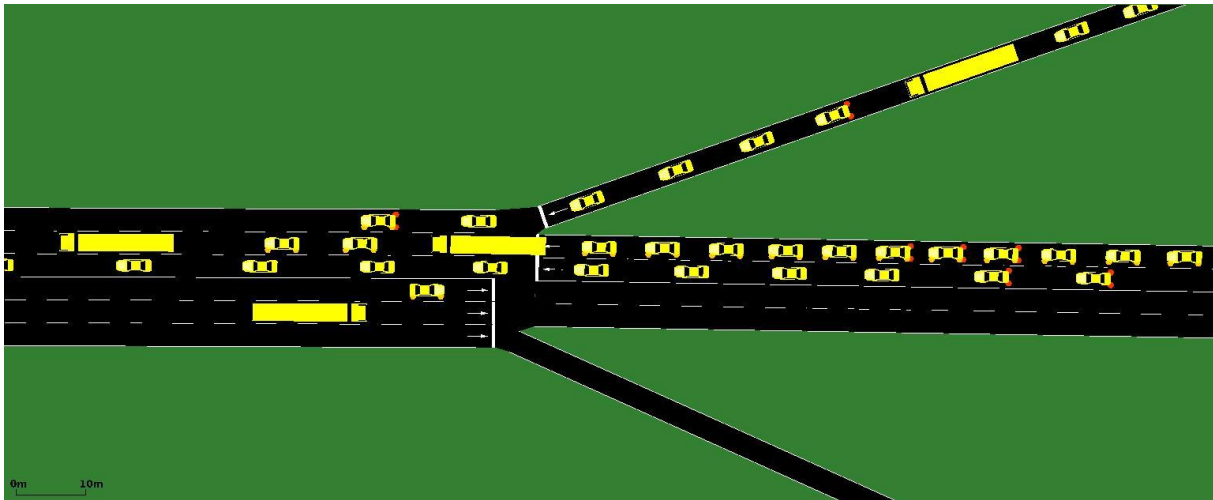
De validiteit van de simulator ten opzichte van de realiteit is een belangrijke factor bij het maken van nuttige aanbevelingen. In dit model is het van belang de validiteit te testen aan de hand van een aantal Key Performance Indicatoren (KPI), ook wel bekend als de uitvoervariabelen. Met de vele berekeningen die het model uitrekent bij elke tijdstap, kan er al snel een grote verandering ontstaan bij elk klein foutje. Dit zorgt al snel voor een significant verschil met de werkelijkheid. Een belangrijke KPI in voertuigsimulaties is de vertraging die weggebruikers ondervinden tijdens hun reis. Hoewel de vertraging op verschillende manieren gemeten kan worden, is er gekozen voor de filezwaarte. Indirect is de vertraging ook af te leiden uit de gemiddelde snelheid die gereden is. Daarbij is de gemiddelde snelheid ook een goede indicatie voor de doorstroming op de weg, waardoor ook deze waarde gevalideerd wordt met werkelijke data van het NDW.

Structurele validatie

Naast representatieve indicatoren is het ook van belang dat het systeem juist wordt weergegeven in het model. Om dit te controleren wordt het model gerund met extreem hoge en lage waarden. Er is in dit model gekeken wat er gebeurd al er extreem veel voertuigen worden toegelaten op de weg. Ook is er een run gedraaid met één wagen en is geobserveerd of deze voertuig de juiste route neemt en zich gedraagt op de manier die was verwacht. Ten slotte is er een deel van de weg afgesloten om de reactie van het verkeer te observeren.

De verwachte file bij de extreem hoge intensiteit deed niet lang op zich wachten in het model. Na een uur was een groot deel van de weg volgelopen en ontstonden er voor de opritten files. Wouter Schakel (persoonlijke correspondentie, 13 april 2017) heeft aangegeven dat files in werkelijkheid ontstaan voordat verkeer bij een afslag toetreden

tot de hoofdweg en door middel van een golfbeweging achter zich vergroot. Deze observatie is ook in het model te maken en draagt hiermee bij aan de validiteit van het model.



Figuur 16 Begin van een file in het model

Bij het sturen van één voertuig door het systeem is te zien dat deze zich naar verwachting gedraagt. De vooraf opgegeven route wordt gereden, waarna de simulatie stopt. Dit gebeurt omdat er geen voertuigen meer aanwezig zijn op de weg. In de resultaten is ook te zien dat er enkel gereden is op de wegen die horen bij de opgegeven route en wel op de rechter rijbaan. Er is immers geen reden voor het voertuig om een andere rijbaan te gebruiken. Ten slotte is ook het rijgedrag bekeken. De auto had een hogere speedfactor meegekregen, wat betekent dat de bestuurder harder zal gaan rijden dan de maximumsnelheid, tot het punt dat de bestuurder nog veilig acht. Uiteindelijk is het voertuig ook sneller aangekomen dan verwacht.

Het afsluiten van een rijbaan moet leiden tot vertragingen op de andere rijbanen. De capaciteit van de weg is hiermee verlaagd en er zal dus een andere verdeling van de weg ontstaan. Ook is het natuurlijk van belang dat er geen auto's gebruik maken van de afgesloten rijstrook. Door de aanname dat doorgaande wegen niet zijn meegenomen in het model, is het niet mogelijk voor de weggebruikers om gebruik te maken van sluiproutes om de snelweg heen. Hierdoor zal is de verwachting dat er in het model een grotere vertraging zal ontstaan, omdat er meer voertuigen op de snelweg blijven en hun routekeuze niet wijzigen.



BEST ROUTE
TO
NORTHERN BLVD
USE 35 ST