

# Optimale verkeersdoorstroming op rotondes en op kruispunten met verkeerslichten





# **Optimale verkeersdoorstroming op rotondes en op kruispunten met verkeerslichten**

BWI-werkstuk  
Liv Harkes  
Begeleiding: Drs. D. Roubos

Vrije Universiteit Amsterdam  
Faculteit der Exacte Wetenschappen  
Bedrijfskunde & Informatica  
De Boelelaan 1081A  
1081 HV Amsterdam



## Voorwoord

Het verslag dat voor u ligt, is het resultaat van een literatuuronderzoek en dient raaklijnen te hebben met één of meer van de onderdelen Bedrijfskunde, Wiskunde en Informatica waar de studie Bedrijfswiskunde en Informatica (BWI) uit bestaat. Dit literatuuronderzoek is een onderdeel van mijn studie BWI aan de Vrije Universiteit in Amsterdam.

In dit verslag wordt een probleemstelling nader uitgewerkt. Het gaat hier om het onderzoek naar diverse modellen die de verkeersdoorstromingen beschrijven met betrekking tot knooppunten in verkeersnetwerken, waarmee vervolgens interessante statistieken zoals de verkeersdichtheid bepaald kan worden. Dit gebeurt zowel voor rotondes als voor kruispunten met verkeerslichten. Aan de hand hiervan kan er gekeken worden of de doorstroming van het verkeer op een rotonde daadwerkelijk beter is dan op een kruispunt met verkeerslichten.

In het bijzonder wil ik mijn begeleider Dennis Roubos van de Vrije Universiteit, die mij heeft geholpen bij de totstandkoming van dit onderzoek en het verslag, mijn dank betuigen.

Liv Harkes  
Mei 2009

## Samenvatting

In dit verslag wordt de probleemstelling nader uitgewerkt. Het gaat hier om het onderzoek naar diverse modellen die de verkeersdoorstromingen beschrijven met betrekking tot knooppunten in verkeersnetwerken, waarmee vervolgens interessante statistieken zoals de verkeersdichtheid bepaald kan worden. Dit gebeurt zowel voor rotondes als voor kruispunten met verkeerslichten. Aan de hand hiervan kan er gekeken worden of de doorstroming van het verkeer op een rotonde daadwerkelijk beter is dan op een kruispunt met verkeerslichten.

### Onderzoeksopzet

Kruispunten vormen de schakels in het verkeersnetwerk tussen de verschillende wegen. Deze kunnen bestaan uit rotondes en/of verkeerslichten om het verkeer soepeler en veiliger te laten doorstromen. Het verkeersaanbod in de verschillende richtingen bepaalt de doorstroming van het verkeer op een rotonde. Voor een optimale doorstroming moet er een goede evenwichtige verdeling over deze wegen zijn, wat niet altijd het geval is. Bij een gelijkmatige aankomst van het verkeer op een rotonde kan de wachttijd korter zijn dan op een kruispunt met verkeerslichten. Daarnaast kan een langere wachttijd voor een rotonde ontstaan door ongelijkmatige aankomst van het verkeer. Tijdens rustige tijden is er nauwelijks sprake van wachttijd.

De doelstelling van het onderzoek is om diverse modellen te onderzoeken die de verkeersdoorstromingen beschrijven met betrekking tot knooppunten in verkeersnetwerken, waarmee vervolgens interessante statistieken zoals de verkeersdichtheid bepaald kan worden. Dit gebeurt zowel voor rotondes als voor kruispunten met verkeerslichten. Aan de hand hiervan kan er gekeken worden of de doorstroming van het verkeer op een rotonde daadwerkelijk beter is dan op een kruispunt met verkeerslichten.

***Zijn er modellen die het gedrag van het verkeer beschrijven op rotondes en op kruispunten met verkeerslichten?***

***Zo ja welk model is het meest geschikt voor dit probleem?***

***Verloopt de doorstroming van het verkeer beter op rotondes dan op kruispunten met verkeerslichten?***

Deze probleemstelling is op een aantal manieren onderzocht. Als eerste is er aandacht besteed aan het Cellular Automata model toegepast op rotondes en een optimalisatiemodel voor kruispunten met verkeerslichten. Daarnaast is er een model besproken op basis van de theorie van wachtrijen. Bij al deze modellen is aangetoond hoe de relatie tussen de rijlengtes, van het aantal wachtende voertuigen, en de dichtheid van het verkeer eruit ziet voor verschillende tijdseenheden.

Ook is er aandacht besteed aan eigen ontwikkelde simulatiemodellen zowel voor rotondes als voor verkeerslichten. Door middel van een zelfgeschreven simulatieprogramma in een programmeertaal zou dit eigen model kunnen worden gesimuleerd.

# Inhoudsopgave

<b>VOORWOORD</b> .....	<b>5</b>
<b>SAMENVATTING</b> .....	<b>6</b>
<b>INHOUDSOPGAVE</b> .....	<b>7</b>
<b>1 INLEIDING</b> .....	<b>8</b>
1.1 Probleemstelling .....	8
1.2 Inleiding rotonde .....	9
1.3 Inleiding verkeerlichten .....	12
1.4 Doelstelling van het onderzoek .....	13
1.5 Vraagstelling.....	14
1.6 Randvoorwaarden .....	14
1.7 Te gebruiken theorieën en concepten .....	14
1.8 Gegevensbronnen.....	15
<b>2 WISKUNDIGE MODELLEN</b> .....	<b>16</b>
2.1 Cellular Automata model .....	16
2.2 Cellular Automata toegepast in Geneve .....	22
2.3 Het optimaliseren van het verkeerslicht .....	27
2.4 Wachtijdtheorie.....	35
2.5 Simulatie en Rapportage .....	38
<b>3 CONCLUSIES + AANBEVELINGEN</b> .....	<b>45</b>
<b>4 REFERENTIES</b> .....	<b>46</b>
<b>5 BIJLAGEN</b> .....	<b>47</b>
5.1 Beschrijving onderzoeksopzet algemeen.....	47

# 1 Inleiding

Het verslag dat voor u ligt, is het resultaat van een literatuuronderzoek. Bij het uitvoeren van dit literatuuronderzoek is er gekozen voor de methodologie, die ontwikkeld is door De Leeuw (2001). Dit onderzoeksopzet wordt beschreven in bijlage 5.1.

In dit verslag wordt de probleemstelling nader uitgewerkt. Het gaat hier om het onderzoeken naar diverse modellen die de verkeersdoorstromingen beschrijven met betrekking tot knooppunten in verkeersnetwerken. Waarmee vervolgens interessante statistieken zoals de verkeersdichtheid bepaald kan worden. Dit gebeurt zowel voor rotondes als voor kruispunten met verkeerslichten. Aan de hand hiervan kan er gekeken worden of de doorstroming van het verkeer op een rotonde daadwerkelijk beter is dan op een kruispunt met verkeerslichten.

## 1.1 Probleemstelling

Kruispunten vormen de schakels in het verkeersnetwerk tussen de verschillende wegen. Deze kunnen bestaan uit rotondes en/of verkeerslichten om het verkeer soepeler en veiliger te laten doorstromen. Er zijn verschillende soorten rotondes. Een belangrijke soort is de rotonde die slechts bestaat uit één rijbaan.

Het verkeersaanbod in de verschillende richtingen bepaalt de doorstroming van het verkeer op een rotonde. Voor een optimale doorstroming moet er een goede evenwichtige verdeling over deze wegen zijn, wat niet altijd het geval is. Bij een gelijkmatige aankomst van het verkeer op een rotonde kan de wachttijd korter zijn dan op een kruispunt met verkeerslichten. Daarnaast kan een langere wachttijd voor een rotonde ontstaan door ongelijkmatige aankomst van het verkeer. Tijdens rustige tijden is er nauwelijks sprake van wachttijd.



## 1.2 Inleiding rotonde

Als een gewoon kruispunt omgebouwd wordt tot een rotonde is dit veiliger, omdat ze de verkeerssnelheid verlagen en het aantal potentiële conflicten tussen verkeersdeelnemers terugbrengen. De verkeersdoorstroming op rotondes is ook meestal beter dan op kruispunten en het lawaai en de uitstoot van gassen nemen af, vergeleken met kruispunten met verkeerslichten. Een rotonde is een cirkelvormige weg met verschillende wegen die als takken verbonden zijn met de cirkel zoals te zien is in figuur 1.

**Figuur 1 Rotonde als cirkelvormige weg**



Er zijn verschillende varianten rotondes:

- Enkelstrooksrotonde
- Ovonde
- Meerstrooksrotonde
- Turborotonde
- Verkeersplein

De meest voorkomende rotondes zijn de enkelstrooksrotonde en de meerstrooksrotonde. Enkelstrooksrotonde hebben één rijstrook, zie figuur 2.

**Figuur 2 Enkelstrooksrotonde**



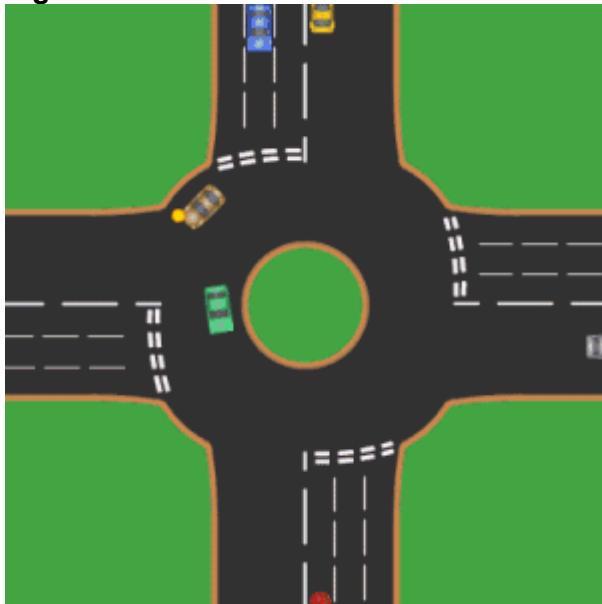
Naast de enkelstrooksrotonde bestaat de ovonde. Het is een rotonde met een ovaalvormige weg met verschillende wegen die als takken verbonden zijn met het ovaal zoals te zien is in figuur 3.

**Figuur 3 Ovonde**



Als de verkeersintensiteit hoog is dan is het noodzakelijk om een extra rijstrook toe te voegen. Zo ontstaat de meerstrooksrotonde. Deze heeft twee of drie rijstroken, zie figuur 4.

**Figuur 4 Meerstrooksrotonde**



Een variant van de meerstrooksrotonde is de turborotonde, zie figuur 5. Bij deze rotonde sorteert het verkeer voor de rotonde voor zodat de juiste rijstrook wordt bereikt. Op de rotonde kan het verkeer niet in elkaar weven. En kan het verkeer zonder conflicten de rotonde verlaten met het overige verkeer. Dit zorgt voor een hogere verkeersdoorstroming en een grotere veiligheid.

**Figuur 5 Turborotonde**



Nog een variant van de meerstrooksrotonde is het verkeersplein, zie figuur 6. Meestal zijn er verkeerslichten aanwezig om het verkeer beter te laten doorstromen.

Soms worden op drukke verkeerspleinen extra rijstroken aangelegd zodat het rechtsafslaande verkeer niet over het verkeersplein hoeft. Deze extra rijstroken worden by-passen genoemd.

**Figuur 6 Verkeersplein**



### 1.3 Inleiding verkeerslichten

Met behulp van lichtsignalen regelt een verkeerslicht het oprijden van het verkeer en deze bestaat uit drie lampen, zie figuur 7. De kleuren rood, oranje en groen.

- Rood moet het verkeer stoppen
- Oranje mag het verkeer doorrijden of stoppen
- Groen kan het verkeer doorrijden

**Figuur 7 Lichtsignalen van een verkeerslicht**



In het verkeerssysteem zijn verkeerslichten een onmisbare schakel. Omdat de toestroming van het verkeer steeds meer toeneemt, moet dit in goede banen geleid worden. Verkeerslichten sturen het verkeer, maar bevordert ook de veiligheid. Met de toegenomen verkeersintensiteit staat het verkeer steeds meer vast op doorgaande routes op het tussengelegen wegennet van dorpen en steden. Door een goede afstelling van verkeerslichten kan de verkeersafwikkeling verbeterd worden.

Er komen geregeld klachten binnen over verkeerslichten.

**Figuur 8 Kruispunt met verkeerslichten**



Merendeel van de mensen ergeren zich aan de lange wachttijd voor een rood verkeerslicht als er geen kruisend verkeer is en vooral 's nachts. De tijdsduur dat een groen verkeerslicht te kort op groen staat veroorzaakt ook irritatie. Verkeerslichten die lang op rood staan leiden tot onveilig gedrag zoals door rood licht rijden, extra gas geven, langzamer rijden of een omweg maken om een verkeerslicht te omzeilen. Of bijvoorbeeld als het links afslaan te lang duurt, rijden de mensen rechtdoor, keren en slaan daarna rechtsaf.

Voor een optimale doorstroming bestaat een verkeersregelsysteem dat met een snelheidsadvies voor een groene golf zorgt in beide richtingen. Dit werkt zelfs bij afstanden tussen kruispunten van meer dan een kilometer. Het systeem werkt voor doorgaand en invoegend verkeer en kan meerdere kruispunten bevatten.

Verkeerslichten spelen een rol bij het bevorderen van de luchtkwaliteit. Een afremmend, stilstaand en optrekkend voertuig vervuult meer dan een voertuig dat met constante snelheid rijdt. Een groene golf zorgt niet alleen voor een optimale doorstroming maar zorgt ook voor een betere luchtkwaliteit.

Daarnaast bevordert een groene golf ook de verkeersveiligheid. Immers hoeft het verkeer dan minder te remmen. Voor een optimale veiligheid zijn rotondes meer geschikt dan een groene golf. Deze kunnen weer ten koste gaan van de doorstroming op drukke wegen.

Het vinden van een goede balans tussen luchtkwaliteit, verkeersveiligheid en doorstroming is belangrijk.

#### **1.4 Doelstelling van het onderzoek**

De doelstelling van het onderzoek is om diverse modellen te onderzoeken die de verkeersdoorstromingen beschrijven met betrekking tot knooppunten in verkeersnetwerken, waarmee vervolgens interessante statistieken zoals de verkeersdichtheid bepaald kan worden. Dit gebeurt zowel voor rotondes als voor kruispunten met verkeerslichten. Aan de hand hiervan kan er gekeken worden of de doorstroming van het verkeer op een rotonde daadwerkelijk beter is dan op een kruispunt met verkeerslichten.

## 1.5 Vraagstelling

De vraagstelling staat in verband met het uiteindelijke doel van het onderzoek. Het vinden van oplossingen voor het probleem of de doorstroming van het verkeer op rotondes beter is dan op kruispunten met verkeerslichten. De vraagstelling kan dan ook als volgt worden geformuleerd:

- Zijn er modellen die het gedrag van het verkeer beschrijven op rotondes en op kruispunten met verkeerslichten?
- Zo ja welk model is het meest geschikt voor dit probleem?
- Verloopt de doorstroming van het verkeer beter op rotondes dan op kruispunten met verkeerslichten?

## 1.6 Randvoorwaarden

Randvoorwaarden:

- De student zal periodiek/regelmatig naar de Vrije Universiteit gaan om met de begeleider te spreken over de stand van zaken en om de afbakening van het probleem.
- Het onderzoek richt zich op de belangrijkste soort rotonde die slechts uit één rijbaan bestaat.
- De vergelijking tussen een rotonde en een kruispunt met verkeerslichten zijn gelijkwaardig wat betreft de aankomstintensiteit van het verkeer.

## 1.7 Te gebruiken theorieën en concepten

Om de vraagstelling te beantwoorden, kunnen een aantal theorieën en concepten gebruikt worden:

- Cellular Automata model
- Model om het verkeerslicht te optimaliseren
- Wachtijdtheorie

### Waarom worden deze theorieën en concepten gebruikt?

Cellular Automata model:

- Dit model wordt gebruikt om de wachttijd van het verkeer op een kruispunt met een rotonde te optimaliseren.

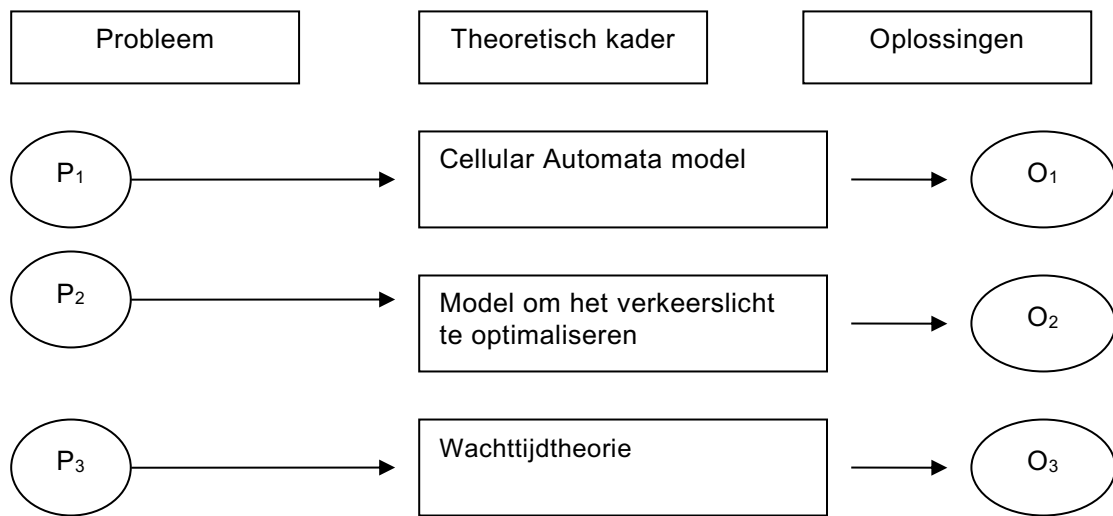
Model om het verkeerslicht te optimaliseren:

- Dit model wordt gebruikt om de wachttijd van het verkeer op een kruispunt met een verkeerslicht te optimaliseren.

Wachtijdtheorie:

- Dit model wordt gebruikt om de wachttijd van het verkeer op een kruispunt met een rotonde of verkeerslicht te optimaliseren.

**Figuur 9 Schema Theorieën en concepten**



### 1.8 Gegevensbronnen

Voor het onderzoek om de wachttijd van het verkeer te optimaliseren voor zowel rotondes als verkeerslichten is er gebruik gemaakt van de data van Het Groene Golf Team. Deze data bevatten de gegevens die nodig zijn voor de beantwoording van de in paragraaf 1.5 geformuleerde vraagstelling.

In dit onderzoek zal aandacht besteed worden aan diverse wiskundige modellen die de verkeersdoorstromingen beschrijven met betrekking tot knooppunten in verkeersnetwerken. Dit gebeurt in hoofdstuk 2 waarin gekeken wordt naar het Cellular Automata model toegepast op rotondes en een optimalisatiemodel voor kruispunten met verkeerslichten. Ook zal er aandacht besteed worden aan een eigen ontwikkeld simulatiemodel waarbij gebruik gemaakt wordt van wachtijdtheorie toegepast op een kruispunt in Groningen.

Het onderzoek zal ook een conclusie bevatten. Hierin wordt terug gekeken op de modellen die in dit verslag besproken zijn. Dit gebeurt in hoofdstuk 3.

## 2 Wiskundige modellen

In dit hoofdstuk worden de verschillende modellen beschreven die geschikt zijn voor het vinden van oplossingen voor het probleem of de doorstroming van het verkeer op rotondes beter is dan op kruispunten met verkeerslichten. Om de vraagstelling te beantwoorden worden de volgende modellen gebruikt.

### 2.1 Cellular Automata model

Bij een Cellular Automata model worden de wegen in cellen verdeeld, waarlangs het voertuig kan verplaatsen. Het voertuig verplaatst naar de dichtstbijzijnde cel met één eenheid, tenzij deze cel al bezet is door een ander voertuig. In dat geval vindt er geen verplaatsing plaats.

De beweging van een voertuig kan als volgt uitgedrukt worden:

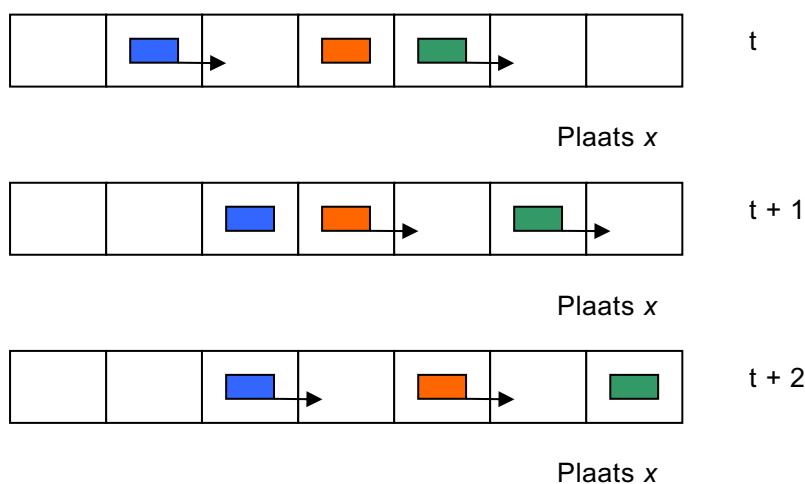
$$n_i(t+1) = n_i^{in}(t)(1 - n_i(t)) + n_i(t)n_i^{out}(t), \quad (1)$$

waarbij  $n_i(t)$  aangeeft of de cel  $i$  wel of niet bezet is op tijdstip  $t$ . Als de cel wel bezet is dan heeft  $n_i(t)$  de waarde 1 en anders heeft  $n_i(t)$  de waarde 0. De variabele  $n_i^{in}(t)$  toont de status dat een voertuig in de cel rijdt. De variabele  $n_i^{out}(t)$  toont de status dat een voertuig uit de cel rijdt. Bovenstaande vergelijking (1) toont de status van de cel één tijdstip later. De variabelen  $n_i^{in}$  en  $n_i^{out}$  worden als volgt gedefinieerd:

$$n_i^{in} = n_{i-1} \quad n_i^{out} = n_{i+1} \quad (2)$$

Ter illustratie wordt dit model getoond in figuur 10.

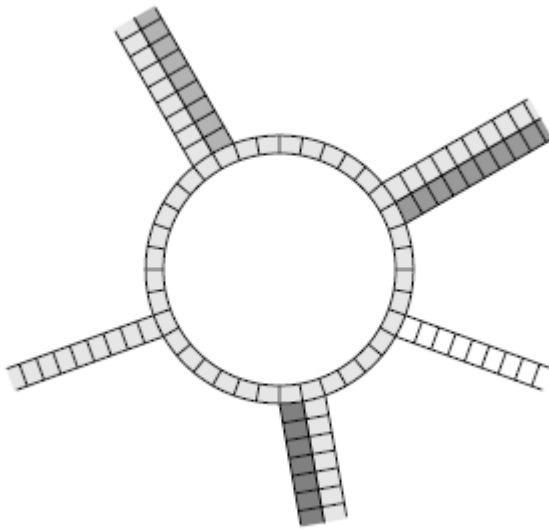
**Figuur 10 Visuele weergave Cellular Automata model**





Hoe een rotonde verdeeld wordt in verschillende cellen wordt weergegeven in figuur 11.

### Figuur 11 Rotonde verdeeld in cellen

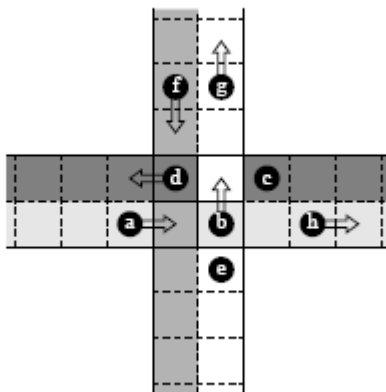


Figuur 11 toont 2 verschillen rijstroken. De lichtgrijze rijstroken betreft het verkeer dat de rotonde arriveert. De donkergrijze rijstroken betreft het verkeer dat de rotonde verlaat.

#### 2.1.1 Model 1 en Model 2

In dit specifieke geval wordt er gebruik gemaakt van een rotonde die bestaat uit een twee aan twee blok aan cellen. Deze is aangesloten op vier binnenkomende en vier uitgaande van vier rijstroken, zoals weergegeven is in figuur 12.

### Figuur 12 Voorbeeld hoe het verkeer zich beweegt op een kruispunt



Figuur 12 toont de voertuigen a, b, c, d, e, f, g. De vier cellen in het midden stelt de rotonde voor. De lichtgrijze rijstroken betreft het verkeer dat de rotonde arriveert. De donkergrijze rijstroken betreft het verkeer dat de rotonde verlaat.

De beschreven modellen in deze paragraaf zijn gebaseerd op het artikel [1]. Deze twee modellen (model 1 of model 2) worden gebruikt om het Cellular Automata model op rotondes toe te passen. Het is belangrijk om te weten wat de beslissing is van een automobilist op de rotonde. De automobilist kan op de rotonde blijven of de rotonde verlaten. Dit hangt af van het doel van het model. Er wordt aangenomen dat er twee verschillende modellen zijn.

### **Model 1:**

Model 1 gaat ervan uit dat niet ieder voertuig beslist welke afslag de automobilist moet nemen op de rotonde. Maar de locatie waar het voertuig staat, bepaald wat het voertuig gaat doen. Bijvoorbeeld als een voertuig op cel  $i$  staat en deze geeft aan dat het voertuig de rotonde verlaat, dan doet het voertuig dat. Naarmate de simulatie vordert, kan het gedrag van cel  $i$  veranderen. Het kan zijn dat cel  $i$  aangeeft dat een voertuig niet de betreffende afslag moet hebben.

### **Model 2:**

Daarentegen in model 2 wordt de beslissing van het voertuig niet ter plaatse bepaald, maar is die van tevoren al bekend. Ieder voertuig heeft dus al een specifieke bestemming zodra deze de rotonde oprijdt. Echter als de afslag vol is en het voertuig de afslag niet kan nemen, dan zou dit voertuig voor een opstopping zorgen. Daarom is in model 2 een regel ingevoerd. Zodra de afslag vol is, dan rijdt het voertuig door op de rotonde en maakt dus een heel rondje. Om vervolgens opnieuw te proberen de afslag te nemen.

## **2.1.2 Verkeersdichtheid**

In deze paragraaf wordt er naar de verkeersintensiteit gekeken. De gemiddelde snelheid  $\langle v \rangle$  wordt bepaald door de gemiddelde verkeersdichtheid  $\rho$ . Onder gemiddelde snelheid verstaan we de fractie voertuigen die zich kunnen bewegen. De gemiddelde verkeersdichtheid is het totale aantal voertuigen verdeeld over het aantal beschikbare cellen. Als het druk is met verkeer kan een voertuig minder snel bewegen.

Wanneer de verkeersdichtheid groot is, dan ontstaat er een rij bij de rotonde. Er zijn drie verschillende locaties bij een kruispunt die van belang zijn voor de verkeersdichtheid.

1. De gemiddelde verkeersdichtheid  $\rho_j$  voor het kruispunt. De gemiddelde snelheid wordt bepaald door de volgende functie  $\langle v_j \rangle = (1 - \rho_j) / \rho_j$ . De gemiddelde snelheid wordt bepaald door de dichtheid van lege cellen. Stel dat  $\rho_j$  naar nul gaat, dan wordt  $v_j$  oneindig groot. Dit is in de praktijk niet realistisch. Aangenomen wordt om voor  $v_j$  een maximum te nemen.
2. De gemiddelde verkeersdichtheid  $\rho_f$  na het kruispunt. De gemiddelde snelheid wordt bepaald door de volgende functie  $\langle v_f \rangle = 1$ . De vrije cellen na het kruispunt geven aan dat alle voertuigen kunnen bewegen, zonder een opstopping, tot de maximale snelheid die is toegestaan. Met andere woorden ieder voertuig kan op ieder tijdstip vooruit plaatsen naar een volgende cel zonder dat de voorganger hem in de weg zit.
3. De gemiddelde verkeersdichtheid  $\rho_r$  op het kruispunt.

Met behulp van deze drie gemiddelde verkeersdichtheden en een constante verkeersdoorstroming  $J = \rho \langle v \rangle$  kan de doorstroming op de verschillende locaties als volgt bepaald worden.

$$J_{queue} = J_{rotary}^{in} = J_{rotary}^{out} = J_{free} \quad (3)$$

De gemiddelde verkeersdichtheid  $\rho_f$  na het kruispunt is gelijk aan één min de verkeersdichtheid  $\rho_j$  voor het kruispunt.

$$\rho_f = 1 - \rho_j \quad (4)$$

Ditzelfde geldt ook voor de gemiddelde verkeersdichtheid  $\rho_j$  voor het kruispunt is gelijk aan één min de verkeersdichtheid  $\rho_f$  na het kruispunt.

$$\rho_j = 1 - \rho_f \quad (5)$$

De kansen dat het verkeer de rotonde benaderd  $J_{rotary}^{in}$  en het verkeer dat de rotonde verlaat  $J_{rotary}^{out}$  is als volgt voor **model 2**.

$$J_{rotary}^{in} = \rho_j \frac{1 - \rho_r}{2} \quad J_{rotary}^{out} = (1 - \rho_f) \frac{\rho_r}{2} \quad (6)$$

De kans dat er een voertuig zich op de rotonde bevindt is een factor  $\frac{1}{2}$ . Ook betekent dit dat de kans een voertuig de rotonde verlaat een  $\frac{1}{2}$  is. Met behulp van formule (3) kunnen de oplossingen voor de resterende verkeersdichtheden berekend worden.

$$\rho_j = \frac{4}{5} \quad \rho_r = \frac{1}{2} \quad \rho_f = \frac{1}{5} \quad (7)$$

De verkeersdichtheden veranderen niet meer nadat de rijlengte  $l$  de lengte van de straat  $L$  heeft bereikt. Alleen de rijlengte  $l$  verandert in lengte en wordt dus langer. De relatie van  $l$  ten opzichte van  $L$  wordt als volgt gegeven.

$$4(L - 2 - l)\rho_f + 4l\rho_j + 4\rho_r = 4L\rho \quad (8)$$

Wanneer  $L$  erg groot is wordt formule (8) als volgt benaderd.

$$\frac{l}{L} = \frac{\rho - \rho_f}{\rho_j - \rho_f} \quad (9)$$

Er kunnen zich een aantal blokkades voordoen.

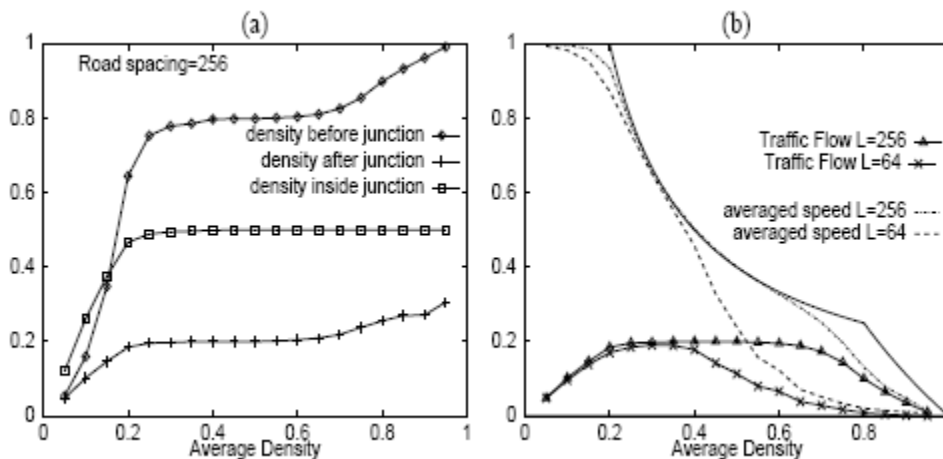
1. Als  $\rho \leq \rho_f$  dan is  $l < 0$ . Dan is er geen rijlengte en is de doorstroming van het verkeer goed.
2. Als  $\rho_f < \rho < \rho_j$  dan varieert  $l$  van 0 tot  $L$ . Als de verkeersdichtheid groeit en de snelheid van een voertuig kleiner wordt is er een maximale stroom met constante  $j = \rho \langle v \rangle = 1/5$ .
3. Als  $\rho > \rho_j$  dan is  $l > L$ . Dit betekent dat de lengte van de wachtrij groeit en tevens de rotonde zijn maximale capaciteit bereikt.

### 2.1.3 De dynamische factoren van een rijlengte

Niet alle rijlengtes zijn meestal van dezelfde lengte. In de spitsuren is het drukker op de weg en nemen de rijlengtes toe. Ook de verschillende soorten rotondes bepalen de rijlengte. Bij een turborotonde wordt er een kleinere rijlengte verwacht. Dit omdat de doorstroming van het verkeer beter is dan bij een gewone rotonde. Sommige locaties zijn drukker dan andere locaties dit kan van invloed zijn op de rijlengte. Bij drukkere locaties is de verwachting dat de rijlengte sneller toeneemt.

Figuur 13a toont de verschillende dichtheden die op drie verschillende locaties worden bekeken. Namelijk voor de rotonde, op de rotonde en na de rotonde in Manhattan met een weglengte  $L = 256$ . Figuur 13b toont de verkeersdoorstroming  $J$  en de gemiddelde snelheid  $\langle v \rangle$  als functie van de verkeersdichtheid  $\rho$  in Manhattan met twee verschillende weglengtes  $L = 64$  en  $L = 256$ . De normale extra grafieklijn toont de voorspelling zonder fluctuaties. In beide grafieken zijn dichtheid op de y-as uitgezet tegen de gemiddelde dichtheid op de x-as.

**Figuur 13 CA simulaties in Manhattan**

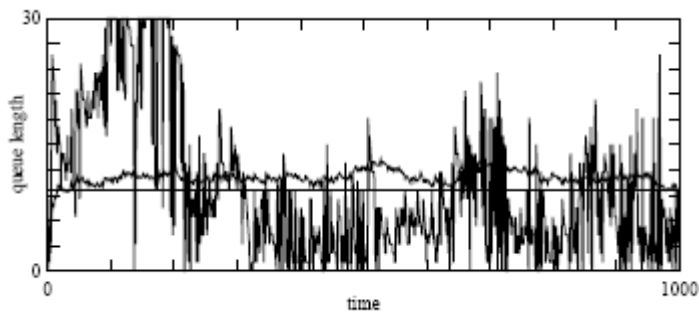


Uit figuur 13a blijkt dat de dichtheid voor de rotonde het grootst is. Op de rotonde en na de rotonde neemt deze dichtheid af. Uit figuur 13b neemt de gemiddelde snelheid af naarmate de dichtheid groter wordt. Ook blijkt dat de gemiddelde snelheid sneller afneemt als de weglengte kleiner wordt. De verkeersdoorstroming neemt ook af als de dichtheid toeneemt.

Wanneer de rijlengte de lengte van  $L$  bereikt heeft, blokkeren de kruispunten en moet onder gereduceerde capaciteit het verkeer doorstromen.

Figuur 14 laat een tijdreeks zien van simulaties wat betreft rijlengtes in Manhattan. De gemiddelde lengte van de rij fluctueert heel erg. Dit geeft aan dat de wachtrij op sommige tijdstippen sneller groeit. Deze resultaten geven een beter inzicht over alle gemiddelde rijlengtes.

**Figuur 14 Tijdreeks van simulaties in Manhattan**



## 2.2 Cellular Automata toegepast in Geneve

In Geneve en zijn voorsteden is het CA model toegepast. In figuur 15 is een graaf te zien van Geneve met de punten als kruispunten en de tussen gelegen wegen. In totaal zijn het 1066 kruispunten en 3145 wegen. De wegen zijn verdeeld in cellen van 5 meter lang met een iteratie tijd van 0,36 seconden. Dus de gemiddelde snelheid is 50 km/h. De totale lengte van de wegen is ongeveer 4000 km en er zijn 800765 cellen nodig.

**Figuur 15 Graaf van Geneve**



Er zijn een aantal voorwaarden:

- Een voertuig kan meerdere rijbanen gebruiken. Als het voertuig de wachtrij benaderd kan het voertuig van rijbaan wisselen mits er ruimte is.
- Er worden twee verschillende snelheden gebruikt. Een snelheid binnen de stad en een snelheid buiten de stad. Snelheid buiten de stad is 2 keer sneller dan de snelheid binnen de stad.
- De routes die een voertuig maakt is van te voren bekend. Het gaat hierbij om 50000 voertuigen tijdens het spitsuur.
- In het model zijn er aankomende voertuigen en vertrekkende voertuigen. Deze worden toegevoegd respectievelijk verwijderd.
- Er wordt een (kleine) kans toegevoegd dat een voertuig de rotonde niet bereikt om sommige aarzelende bestuurders te simuleren. Dit voorkomt de vorming van de verkeersstroom.

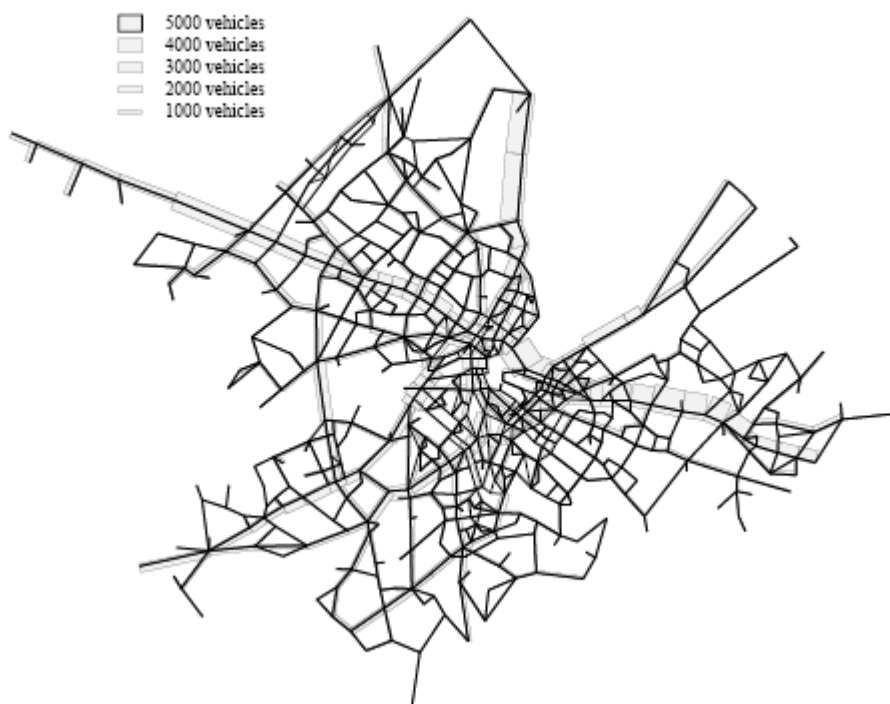
Alle kruispunten worden hier als rotondes gezien. De grootte van de rotonde heeft invloed op de maximale doorstroming van het verkeer. Deze zijn zo gekozen om blokkades te voorkomen.

### 2.2.1 Vertrek aankomst matrix Geneve

Een vertrek aankomst matrix geeft een duidelijk beeld hoe de route verloopt van een automobilist met zijn bijbehorende vertrektijd. Deze matrix is ook opgesteld voor Geneve. Het verkeer rijdt van punt A naar punt B. Er is hier sprake van 49418 verschillende routes om van punt A naar punt B te komen met een gemiddelde aantal voertuigen van punt A naar punt B. Uit deze gegevens weet men de route van elke bestuurder. Om het kortste pad te vinden is een moeilijk probleem om op te lossen. Het doel is om op een verstandige wijze een set van alle routes van oorsprong tot alle bestemmingen te verkrijgen. Om dit kortste pad probleem in Geneve te optimaliseren is er gebruik gemaakt van het computerprogramma Emme2 dat wordt gebruikt door traffic engineers. Eerst wordt het kortste pad berekend tussen het vertrekpunt en aankomstpunt. Hiervoor worden de standaard graaf algoritmes gebruikt. Elke weg krijgt een gewicht dat correspondeert met de lengte van de weg. Vervolgens wordt de vertrek aankomst matrix gebruikt om het totaal aantal voertuigen over de route te bekijken. De wegen die druk zijn krijgen een hogere wegingsfactor. Met deze nieuwe wegingsfactoren wordt weer het kortste pad algoritme toegepast. Deze procedure wordt een aantal keer herhaald totdat het probleem geoptimaliseerd is.

De resultaten van de hoeveelheid verkeer die wordt verkregen met behulp van iteratieve kortste pad methode, worden in figuur 16 getoond. Deze informatie van de verschillende routes worden gebruikt voor het Cellular Automata model.

**Figuur 16 Resultaten van het verkeer van startpunt naar bestemmingspunt**





## 2.2.2 Reistijd, risico's en dynamische stroom diagram Geneve

De vertrek aankomst matrix geeft informatie over het aantal voertuigen tijdens het spitsuur. Dit spitsuur heeft een lengte van 90 minuten. Betekent wel dat de meerderheid van het aantal voertuigen na deze periode arriveert op plaats van bestemming.

Er wordt aangenomen dat de vertrektijden niet uniform verdeeld is. Deze verdeling bevat twee parameters.

- De duur van de vertrekperiode  $l$
- De ratio  $\rho_2/\rho_1$  specificeert de graad van niet uniformiteit.

Hier wordt aangenomen dat  $\rho_2/\rho_1 = 6$  en  $l = 45$  minuten en alle voertuigen zijn na 90 minuten gearriveerd.

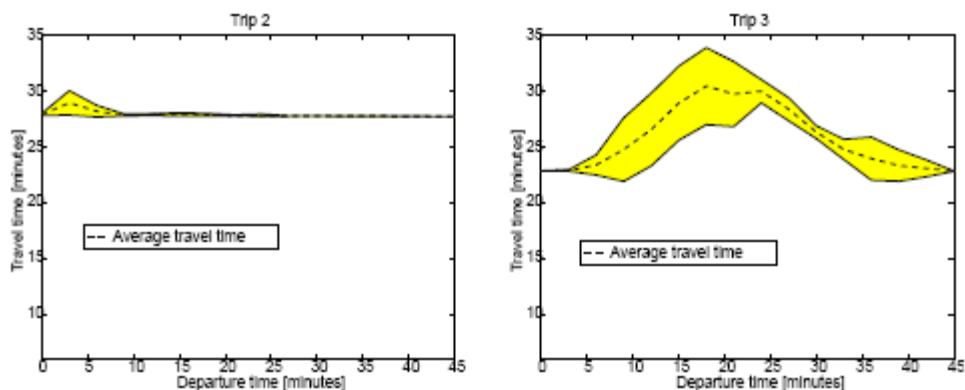
Het totaal aantal voertuigen van punt A naar punt B wordt gegeven met de volgende formule.

$$\int_l dt \rho_{AB}(t) = N_{AB}$$

$\rho_{AB}(t)$  is de dichtheid van voertuigen op tijdstip  $t$  dat van punt A naar punt B wilt gaan.

Er wordt voornamelijk naar het probleem gekeken wat de tijd die nodig is om van punt A naar punt B te komen. Dit is voor belang voor de automobilist om te weten hoe laat ze moeten vertrekken vanaf hun huis om op tijd op hun werk te komen. Tijdens de simulaties zijn er vier routes bestudeerd, zie figuur 15. De resultaten van route twee en drie staan in figuur 17. Daaruit blijkt dat de reistijd erg afhangt van het tijdstip wanneer de automobilist vertrekt. De resultaten van routes één en vier zijn aan elkaar gelijk.

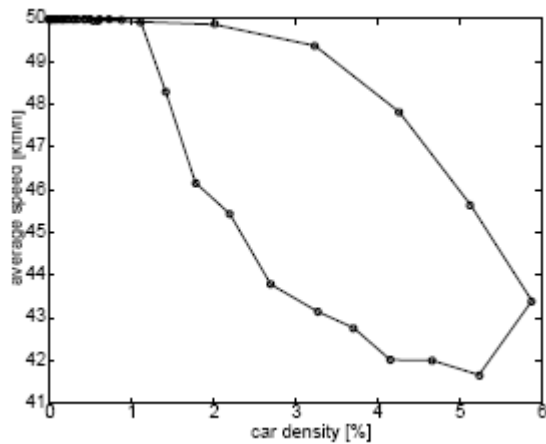
**Figuur 17 Resultaten van twee verschillende routes in Geneve**



Bij route twee is de gemiddelde reistijd in het begin langer. Het verschil is erg klein. Vijf circa tien minuten na het begintijdstip van het spitsuur maakt het voor de automobilist niet uit hoe laat deze vertrekt, want de reistijd blijft continu. Bij route drie zijn er sterke variaties. Vijftien circa twintig minuten na het begintijdstip van het spitsuur is het voor de automobilist niet verstandig om te vertrekken. De gemiddelde reistijd is dan langer.

Naast de berekende reistijd wordt er ook gekeken naar de gemiddelde snelheid  $\langle v \rangle$  van een voertuig als functie van de gemiddelde verkeersdichtheid  $\rho$ , zie figuur 18.

**Figuur 18 gemiddelde snelheid als functie van de gemiddelde verkeersdichtheid**



De gemiddelde verkeersdichtheid  $\rho$  wordt bepaald door het aantal voertuigen in het netwerk. Als de verkeersdichtheid toeneemt, neemt de gemiddelde snelheid af, dit geeft de bovenste grafieklijn aan. De gemiddelde snelheid  $\langle v \rangle$  op een bepaald tijdstip is de fractie van voertuigen dat kan bewegen. Na een file ontstaat er vaak weer kleine files waardoor de snelheid minder snel toeneemt als de dichtheid afneemt, dit geeft de onderste grafieklijn aan.

## 2.3 Het optimaliseren van het verkeerslicht

In deze paragraaf wordt een model beschreven om de rijlengtes te minimaliseren bij een kruispunt met verkeerslichten. Deze kruispunten bestaan uit vier twee-baans wegen. Op ieder hoek staat een verkeerslicht. Nu is de vraag hoe kunnen deze verkeerslichten zo optimaal mogelijk worden afgesteld met behulp van een verkeerslichtschema. Dit schema bestaat uit tijdsperiodes wanneer het verkeerslicht van kleur verandert in rood, oranje en groen.

Als de verkeersdrukke toeneemt, kan dit leiden tot logistieke problemen. Het verkeer kan zich minder snel voortbewegen en kan zelfs een snelheid van minder dan 10 km/h bereiken. Een gevolg is dat de kosten van de producten en diensten duurder worden.

Er zijn bijvoorbeeld een aantal methoden om deze verkeersdrukke te verminderen en de snelheid te verhogen:

- Het aanleggen van nieuwe wegen.
- Het stimuleren door met het openbaar vervoer te reizen en de wegenbelasting te verhogen
- De prijzen van de tolwegen te verhogen.
- Het promoten van carpoolen.

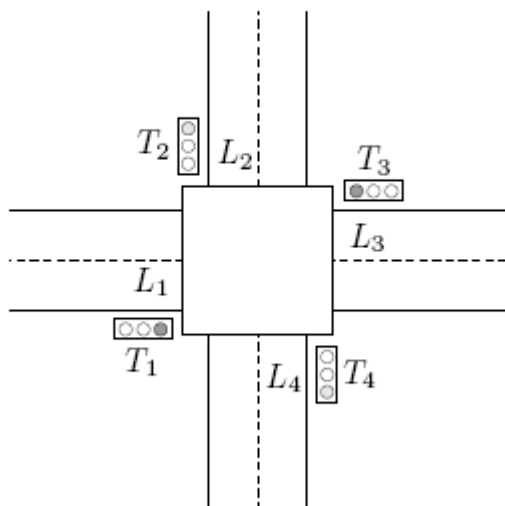
Het komt er kort op neer dat het aanleggen van nieuwe wegen en een betere controle over het verkeer de effectieve oplossingen zijn. Het goed afstemmen van de verkeerslichten in stedelijke gebieden en het toepassen van de groene golf is een oplossing.

Hier wordt een model ontwikkeld die de rijlengte als functie van de tijd dat een verkeerslicht nodig heeft om van kleur te veranderen. De gebruikte data die hiervoor worden gebruikt is de input data en de output data. Het aantal voertuigen dat een kruispunt arriveert, is de input data. En het aantal voertuigen dat een kruispunt verlaat is de output data. Het **doel** van dit model is om de gemiddelde rijlengte te minimaliseren en dus ook de gemiddelde wachttijd.

### 2.3.1 De opzet van het verkeerslichtmodel

Het model wordt toegepast op een kruispunt met vier twee-baans wegen zoals te zien is in figuur 19.

**Figuur 19** Kruispunt met verkeerslichten



De vier wegen zijn  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  en  $L_4$  met op elke hoek een verkeerslicht  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  en  $T_4$ . De verkeerslichten kunnen in drie kleuren veranderen rood, oranje en groen. De aankomstintensiteit van voertuigen wordt uitgedrukt in  $\lambda$  per tijdseenheid  $t$ . Voor iedere weg  $L_i$  is er een  $\lambda_i(t)$  voor  $i = 1, 2, 3$  en  $4$ . Als het verkeerslicht op groen springt wordt de vertrekintensiteit uitgedrukt in  $\mu_i$  per tijdseenheid  $t$ . Wanneer het verkeerslicht op oranje staat wordt deze vertrekintensiteit uitgedrukt in  $\varphi_i(t)$ . De tijdsduur dat het verkeerslicht op oranje staat is een vaste tijd en gelijk aan  $\delta_{oranje}$ .

De tijdseenheden dat de verkeerslichten  $T_1$  en  $T_3$  van oranje naar rood springt zijn  $t_0, t_2, t_4, \dots$ . Dan springen de verkeerslichten  $T_2$  en  $T_4$  van rood naar groen. De tijdseenheden dat de verkeerslichten  $T_1$  en  $T_3$  van rood naar groen springt zijn  $t_1, t_3, t_5, \dots$ . Dan springen de verkeerslichten  $T_2$  en  $T_4$  van oranje naar rood. Een verkeerslichtschema wordt weergegeven in figuur 20.

**Figuur 20** Schema van de verkeerslichten

Periode	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$
$t_0 - t_1 - \delta_{oranje}$	rood	groen	rood	groen
$t_1 - \delta_{oranje} - t_1$	rood	oranje	rood	oranje
$t_1 - t_2 - \delta_{oranje}$	groen	rood	groen	rood
$t_2 - \delta_{oranje} - t_2$	oranje	rood	oranje	rood
$t_2 - t_3 - \delta_{oranje}$	rood	groen	rood	groen
$t_3 - \delta_{oranje} - t_3$	rood	oranje	rood	oranje
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

Als een verkeerslicht  $T_i$  op tijdstip  $t_k$  van rood op groen springt, wordt de periode uitgedrukt in  $(t_k, t_{k+1} - \delta_{oranje})$ . Veronderstel dat  $\delta_k = t_{k+1} - t_k$  voor  $k \in N$ . Verder is  $G_1 = G_3 = \{1, 3, \dots\}$  en  $G_2 = G_4 = \{0, 2, \dots\}$  en is  $k \in G_i$ . De lengte van de rij voor iedere weg  $L_i$  wordt uitgedrukt in  $l_i(t)$  per tijdseenheid  $t$ . De tijdsduur dat het verkeerslicht op oranje staat, wordt uitgedrukt in  $\delta$ .

Verder geldt:

- $0 \leq \delta_{oranje} < \delta_k$  voor alle  $k$
- $\lambda_i(t), \mu_i(t), \varphi_i(t) \geq 0$  voor alle  $i$  en alle  $t$
- $t_k < t_{k+1}$  voor alle  $k$
- $l_i(t) \geq 0$  voor alle  $i$  en alle  $t$

### 2.3.2 Het verkeerslichtmodel

Bij een groen verkeerslicht  $T_1$  komen er voertuigen aan met intensiteit  $\lambda_1(t)$  en er rijden voertuigen door met intensiteit  $\mu_1(t)$ . Tevens bij een rood verkeerslicht komen er alleen voertuigen aan met intensiteit  $\lambda_1(t)$ . Voor een oranje verkeerslicht rijden voertuigen door met intensiteit  $\varphi_1(t)$ .

De verandering van rijlengte op  $L_1$  wordt gegeven door (rood, groen en oranje):

$$\frac{dl_1(t)}{dt} = \begin{cases} \lambda_1(t) & \text{als } t \in (t_{2k}, t_{2k+1}) \\ \lambda_1(t) - \mu_1(t) & \text{als } t \in (t_{2k+1}, t_{2k+2} - \delta_{oranje}) \\ \lambda_1(t) - \varphi_1(t) & \text{als } t \in (t_{2k+2} - \delta_{oranje}, t_{2k+2}) \end{cases} \quad (10)$$

Dit geeft weer de volgende relatie om de ontwikkeling van de rijlengte te bepalen voor  $k = 0, 1, 2, \dots$

$$l_1(t_{2k+1}) = l_1(t_{2k}) + \int_{t_{2k}}^{t_{2k+1}} \lambda_1(t) dt \quad (11)$$

$$l_1(t_{2k+2}) = l_1(t_{2k+1}) + \int_{t_{2k+1}}^{t_{2k+2} - \delta_{oranje}} (\lambda_1(t) - \mu_1(t)) dt + \int_{t_{2k+2} - \delta_{oranje}}^{t_{2k+2}} (\lambda_1(t) - \varphi_1(t)) dt \quad (12)$$

### 2.3.3 Een eenvoudig verkeerslichtmodel

Het bovenstaande model kan nog niet volledig worden gebruikt voor wiskundige analyse. Om de verkeerslichten optimaal te analyseren zijn er een aantal aannames.

- De variabelen van de rijlengte zijn continu,
- De gemiddelde aankomstintensiteit en vertrekintensiteit van voertuigen zijn continu,
- Voor elke weg geldt dat de vertrekintensiteit tijdens het groene verkeerslicht groter is dan tijdens het oranje verkeerslicht.

Bovenstaande aannames worden gebruikt om de verkeerslichten zo optimaal mogelijk af te stellen. Stel dat het verkeerslicht op groen of op oranje staat en de rijlengte is langer dan 0. De gemiddelde aankomstintensiteit is  $\bar{\lambda}_i$  en de gemiddelde vertrekintensiteit is  $\bar{\mu}_i$  of  $\bar{\varphi}_i$  op de weg  $L_i$ . De tijdsduur dat het verkeerslicht op oranje staat, wordt uitgedrukt in  $\delta$ .

Er wordt aangenomen dat:

$$\lambda_i(t) = \bar{\lambda}_i \quad \text{voor alle } t,$$

$$\mu_i(t) = \begin{cases} \bar{\mu}_i & \text{als } t \in \bigcup_{k \in G_i} (t_k, t_{k+1} - \delta_{\text{oranje}}) \text{ en } l_i(t) > 0 \\ 0 & \text{anders} \end{cases}$$

$$\varphi_i(t) = \begin{cases} \bar{\varphi}_i & \text{als } t \in \bigcup_{k \in G_i} (t_{k+1} - \delta_{\text{oranje}}, t_{k+1}) \text{ en } l_i(t) > 0 \\ 0 & \text{anders} \end{cases}$$

$\bar{\lambda}_i$ ,  $\bar{\mu}_i$  en  $\bar{\varphi}_i$  zijn constante getallen.  $\bar{\lambda}_i$ ,  $\bar{\mu}_i$ ,  $\bar{\varphi}_i \geq 0$  en  $\bar{\varphi}_i \leq \bar{\mu}_i$ .

Vervolgens geldt dat een rijlengte nooit een negatief getal kan zijn. Nu gelden de volgende formules om een rijlengte te bepalen.

$$l_1(t_{2k+1}) = \max(l_1(t_{2k}) + \bar{\lambda}_1 \delta_{2k}, 0) \quad (13)$$

$$l_1(t_{2k+2} - \delta_{\text{oranje}}) = \max(l_1(t_{2k+1}) + (\bar{\lambda}_1 - \bar{\mu}_1)(\delta_{2k+1} - \delta_{\text{oranje}}), 0) \quad (14)$$

$$l_1(t_{2k+2}) = \max(l_1(t_{2k+2} - \delta_{\text{oranje}}) + (\bar{\lambda}_1 - \bar{\varphi}_1)\delta_{\text{oranje}}, 0) \quad (15)$$

$$= \max(l_1(t_{2k+1}) + (\bar{\lambda}_1 - \bar{\mu}_1)\delta_{2k+1} + (\bar{\mu}_1 - \bar{\varphi}_1)\delta_{\text{oranje}}, (\bar{\lambda}_1 - \bar{\varphi}_1)\delta_{\text{oranje}}, 0)$$

Voor  $k = 0, 1, 2, \dots$   $l_i(t) \geq 0$  voor alle  $t$ .

**Uitleg vergelijking 13:**

Hier wordt de rijlengte bepaald dat het verkeerslicht  $T_1$  op rood staat. Deze rijlengte bestaat uit een sommatie van het aantal voertuigen dat stopt als het verkeerslicht op rood staat plus het aantal voertuigen dat tijdens het oranje verkeerslicht niet doorrijdt. Het getal 0 geeft aan dat de rijlengte nooit negatief kan zijn. Daarnaast geldt ook dat de rijlengte nooit langer kan zijn dan de weg zelf.

**Uitleg vergelijking 14:**

Hier wordt de rijlengte bepaald dat het verkeerslicht  $T_1$  op groen staat voordat het op oranje springt. Deze rijlengte bestaat uit een sommatie van het aantal voertuigen op het moment dat het verkeerslicht van rood op groen springt. Bij een groen verkeerslicht  $T_1$  komen er voertuigen aan met intensiteit  $\lambda_1(t)$  en er rijden voertuigen door met intensiteit  $\mu_1(t)$ . Het getal 0 geeft aan dat de rijlengte nooit negatief kan zijn. Daarnaast geldt ook dat de rijlengte nooit langer kan zijn dan de weg zelf.

**Uitleg vergelijking 15:**

Hier wordt de rijlengte bepaald dat het verkeerslicht  $T_1$  op groen staat plus de periode dat het verkeerslicht op oranje staat. Deze rijlengte bestaat uit een sommatie van het aantal voertuigen op het moment dat het verkeerslicht van groen op oranje springt plus het aantal voertuigen dat tijdens het oranje verkeerslicht niet doorrijdt. Bij een oranje verkeerslicht  $T_1$  komen er voertuigen aan met intensiteit  $\lambda_1(t)$  en er rijden voertuigen door met intensiteit  $\varphi_1(t)$ . Het getal 0 geeft aan dat de rijlengte nooit negatief kan zijn. Daarnaast geldt ook dat de rijlengte nooit langer kan zijn dan de weg zelf.

Nu is dit alleen voor  $l_1$  geformuleerd. Er zijn voor  $l_2(t_k)$ ,  $l_3(t_k)$  en  $l_4(t_k)$  gelijkwaardige vergelijkingen.

$$x_k = \begin{bmatrix} l_1(t_k) \\ l_2(t_k) \\ l_3(t_k) \\ l_4(t_k) \end{bmatrix}, \quad b_1 = \begin{bmatrix} \bar{\lambda}_1 \\ \bar{\lambda}_2 - \bar{\mu}_2 \\ \bar{\lambda}_3 \\ \bar{\lambda}_4 - \bar{\mu}_4 \end{bmatrix}, \quad b_2 = \begin{bmatrix} \bar{\lambda}_1 - \bar{\mu}_1 \\ \bar{\lambda}_2 \\ \bar{\lambda}_3 - \bar{\mu}_3 \\ \bar{\lambda}_4 \end{bmatrix},$$

$$b_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ (\bar{\mu}_2 - \bar{\varphi}_2)\delta_{oranje} \\ 0 \\ (\bar{\mu}_4 - \bar{\varphi}_4)\delta_{oranje} \end{bmatrix}, \quad b_4 = \begin{bmatrix} (\bar{\mu}_1 - \bar{\varphi}_1)\delta_{oranje} \\ 0 \\ (\bar{\mu}_3 - \bar{\varphi}_3)\delta_{oranje} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$b_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ \max((\bar{\lambda}_2 - \bar{\varphi}_2)\delta_{oranje}, 0) \\ 0 \\ (\max((\bar{\lambda}_4 - \bar{\varphi}_4)\delta_{oranje}, 0)) \end{bmatrix}, \quad b_6 = \begin{bmatrix} \max((\bar{\lambda}_1 - \bar{\varphi}_1)\delta_{oranje}, 0) \\ 0 \\ (\max((\bar{\lambda}_3 - \bar{\varphi}_3)\delta_{oranje}, 0)) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dan zijn er de volgende formules:

$$x_{2k+1} = \max(x_{2k} + b_1 \delta_{2k} + b_3, b_5) \quad (16)$$

$$x_{2k+2} = \max(x_{2k+1} + b_2 \delta_{2k+1} + b_4, b_6) \quad (17)$$

Voor  $k = 0, 1, 2, \dots$

### 2.3.4 Optimalisatie van het verkeerslichtmodel

In deze paragraaf wordt uitgelegd hoe er een optimale berekening uitgevoerd kan worden voor de verschillende tijdseenheden om de wachtrij te minimaliseren voor ieder verkeerslicht.

Gegeven:

$$G_i(N) = G_i \cap \{0, 1, 2, \dots, N-1\} \quad \text{met } N \text{ als integer}$$

De functies die voor deze optimalisatie nodig zijn, worden hieronder weergegeven:

- Het gewicht van de gemiddelde lengte over alle rijen.

$$J_1 = \sum_{i=1}^4 w_i \frac{\int_{t_0}^{t_N} l_i(t) dt}{t_N - t_0} \quad (18)$$

- Het gewicht van de gemiddelde lengte over de slechtste rij.

$$J_2 = \max_i \left( w_i \frac{\int_{t_0}^{t_N} l_i(t) dt}{t_N - t_0} \right) \quad (19)$$

- Het gewicht van de rijlengte in het slechtste geval.

$$J_3 = \max_{i,t} (w_i l_i(t)) \quad (20)$$

- Het gewicht van de gemiddelde wachttijd over alle rijen.

$$J_4 = \sum_{i=1}^4 w_i \frac{\int_{t_0}^{t_N} l_i(t) dt}{\bar{\lambda}_i (t_N - t_0)} \quad (21)$$

- Het gewicht van de gemiddelde wachttijd van de slechtste rij.

$$J_5 = \max_i \left( w_i \frac{\int_{t_0}^{t_N} l_i(t) dt}{\bar{\lambda}_i (t_N - t_0)} \right) \quad (22)$$



In alle gevallen is  $w_i > 0$  voor alle  $i$ . De factor  $w_i$  geeft het gewicht aan hoe zwaar de weg mag wegen. Als voorbeeld dat  $w_1 = w_3 = 2$  en  $w_2 = w_4 = 1$  betekent dat de wegen  $L_1$  en  $L_3$  100% belangrijker zijn en dus meer gebruikt worden.

Om een de rijlengte te optimaliseren is het van belang om de tijdsduur van een groen verkeerslicht te maximaliseren. En een rood verkeerslicht te minimaliseren onder bepaalde condities. Dit kan op de volgende manier worden opgesteld.

**Minimaliseer  $J$**  (23)

Onder de volgende condities:

$$\delta_{\min, \text{groen}, 1} \leq \delta_{2k+1} - \delta_{\text{oranje}} \leq \delta_{\max, \text{groen}, 1} \quad k = 0, 1, \dots, \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor - 1 \quad (24)$$

$$\delta_{\min, \text{groen}, 2} \leq \delta_{2k} - \delta_{\text{oranje}} \leq \delta_{\max, \text{groen}, 2} \quad k = 0, 1, \dots, \left\lfloor \frac{N-1}{2} \right\rfloor \quad (25)$$

$$x_k \leq x_{\max} \quad k = 0, 1, \dots, N \quad (26)$$

$$x_{2k+1} = \max(x_{2k} + b_1 \delta_{2k} + b_3, b_5) \quad k = 0, 1, \dots, \left\lfloor \frac{N-1}{2} \right\rfloor \quad (27)$$

$$x_{2k+2} = \max(x_{2k+1} + b_2 \delta_{2k+1} + b_4, b_6) \quad k = 0, 1, \dots, \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor - 1 \quad (28)$$

Waar:

$\delta_{\min, \text{groen}, i}$  is de minimale tijdsduur dat het verkeerslicht  $T_i$  op groen staat.

$\delta_{\max, \text{groen}, i}$  is de maximale tijdsduur dat het verkeerslicht  $T_i$  op groen staat.

$(x_{\max})_i$  is de maximale rijlengte van rijstrook  $L_i$ .

Het zo efficiënt mogelijk oplossen van de minimalisatie van  $J$ , worden eerst de vergelijkingen waar  $k$  in voorkomt vereenvoudigd.

$$x_{2k+1} \geq x_{2k} + b_1 \delta_{2k} + b_3 \quad (29)$$

$$x_{2k+1} \geq b_5 \quad (30)$$

$$(x_{2k+1})_i = (x_{2k} + b_1 \delta_{2k} + b_3)_i \quad \text{of} \quad (x_{2k+1})_i = (b_5)_i \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (31)$$

Als de vergelijkingen op 0 gesteld worden is dit gelijk aan:

$$x_{2k+1} - x_{2k} - b_1 \delta_{2k} - b_3 \geq 0 \quad (32)$$

$$x_{2k+1} - b_5 \geq 0 \quad (33)$$

$$\sum_{i=1}^4 (x_{2k+1})_i - x_{2k} - b_1 \delta_{2k} - b_3)_i (x_{2k+1} - b_5)_i = 0 \quad (34)$$

Er wordt verondersteld dat:

$$x^* = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} \quad \text{en} \quad \delta^* = \begin{bmatrix} \delta_0 \\ \delta_1 \\ \vdots \\ \delta_{N-1} \end{bmatrix}$$

Het probleem krijgt de volgende vorm:

**Minimaliseer  $J$**  (35)

Onder de volgende condities:

$$Ax^* + B\delta^* + c \geq 0 \quad (36)$$

$$x^* + d \geq 0 \quad (37)$$

$$Ex^* + F\delta^* + g \geq 0 \quad (38)$$

$$(Ax^* + B\delta^* + c)^T (x^* + d) = 0$$

A, B, E, F zijn de matrices en c, d, g zijn de vectoren. Er is een algoritme ontwikkeld om dit lineaire probleem op te lossen. Het wordt het Extended Linear Complementary Problem (ELCP) genoemd. De variabelen  $x^*$  en  $\delta^*$  worden samengesteld tot een vector  $V$ .

$$V = \left\{ \begin{bmatrix} x_i^* \\ \delta_i^* \end{bmatrix} \mid i = 1, 2, \dots, r \right\}$$

Met als index sets  $\Lambda = \{\phi_j \mid j = 1, 2, \dots, p\}$  en  $\phi_j \subseteq \{1, 2, \dots, r\}$  voor alle  $j$ . Met als gevolg dat voor  $j$  een combinatie ontstaat in de vorm van:

$$\sum_{i \in \phi_j} v_i \begin{bmatrix} x_i^* \\ \delta_i^* \end{bmatrix}$$

Onder de voorwaarden, dat  $v_i \geq 0$  en  $\sum_{i \in \phi_j} v_i = 1$  is de oplossing van de minimalisatie van  $J$ .

De vectoren  $V$  zijn de vertices van de polyhedron  $P$  en iedere index set  $\phi_j$  vormen deze polyhedron.

## 2.4 Wachtijdtheorie

Een heel ander model om het verkeer te modelleren komt voort uit de wachtijdtheorie. Deze theorie wordt toegepast om het verkeer te modelleren en te simuleren. Eerst worden een aantal karakteristieken van het model gespecificeerd.

### Basis

In dit model is er sprake van een dienst of service waarbij klanten geholpen. De klanten arriveren om van deze service gebruik te maken. Het vastleggen over het aankomstproces van klanten en over de service is van belang. Daarnaast is het ook belangrijk om te weten hoeveel klanten kunnen wachten in de wachtrij totdat ze aan de beurt zijn en ook de populatiegrootte kan van belang zijn.

### Aankomstproces

Het arriveren van klanten kan eindig of oneindig groot zijn. Een aankomstproces dat een oneindige populatie veronderstelt, kan een *Poisson proces* gekozen worden om aankomsten te modelleren. Voor een Poisson proces gelden de volgende eigenschappen.

- Klanten komen één voor één aan.
- Het aantal aankomsten in disjuncte tijdsintervallen zijn onafhankelijk van elkaar.
- De kansverdeling in een gegeven tijdsinterval van het aantal klanten dat arriveert, heeft een Poisson verdeling waarvan de lengte van het tijdsinterval evenredig is met de verwachtingswaarde. Hieruit volgt dat de tussenaankomsttijden exponentieel verdeeld zijn.

### Bedieningsmechanismen

De tijdsduur dat een klant bediend wordt, wordt uitgedrukt in een servicetijd. Er moet gespecificeerd worden of er één of meerdere bedienden zijn. Stel dat er meerdere bedienden zijn, dan moet aangegeven worden dat elke bediende een aparte wachtrij heeft of één gezamenlijke wachtrij. Van belang is in welke volgorde de klanten bediend worden. Meestal is dit in overeenstemming met de volgorde van klanten waarin ze arriveren. In sommige gevallen hebben bepaalde klanten voorrang.

Een vaak gebruikte kansverdeling van de bedieningstijd van een klant is de *exponentiële verdeling*. Voor deze kansverdeling geldt:

$$P(\text{bedieningstijd is hooguit } t \text{ tijdseenheden}) = 1 - e^{-\mu t} \quad \text{voor } t > 0$$

Deze exponentiële verdeling heeft een verwachting  $1/\mu$  met parameter  $\mu$ .

### **Wachtrijcapaciteit**

Wachtrijen kunnen onderscheid worden in twee verschillende typen. Namelijk eindige en oneindige wachtrijen. Bij oneindige wachtrijen wordt de capaciteit van de wachtrij onbegrensd groot aangenomen. Elke gearriveerde klant wordt toegelaten aan de wachtrij en wordt bediend. Bij eindige wachtrijen kunnen mensen wel wachten in de wachtrij, maar op een gegeven moment, als de wachtrij vol is, worden nieuwe binnenkomende klanten geweigerd.

### **Kendall's notatie**

Wachttijdmodellen worden door middel van een handige Kendall's notatie beschreven. Deze bestaat uit  $a/b/c$  of  $a/b/c/d$ . Hierin is het eerste symbool  $a$  het aankomstproces. Voor  $a$  kunnen de volgende symbolen gebruikt worden:

- M: Het aankomstproces is een Poisson proces.
- D: De aankomsten hebben deterministische tussentijden.

Het tweede symbool  $b$  is de verdeling van de bedieningstijd. Voor  $b$  kunnen de volgende symbolen gebruikt worden:

- M: De bedieningstijd heeft een exponentiële verdeling.
- D: De bedieningstijd heeft een deterministische verdeling.
- G: De bedieningstijd heeft een algemene kansverdeling.

Het derde symbool  $c$  is het aantal beschikbare bedienden. Het vierde symbool  $d$  geeft het aantal maximale klanten dat kan worden toegelaten in het systeem.

### 2.4.1 Wachttijdmodel M/M/1

Bij een M/M/1 wachttijdmodel arriveren klanten volgens een Poisson proces met een gemiddelde van  $\lambda$  klanten per tijdseenheid. De bedieningstijd is exponentieel verdeeld met een verwachting van  $1/\mu$ . En er is één bediende aanwezig die slechts één klant tegelijk kan helpen. De wachtruimte is oneindig groot.

De grootheid  $\rho$  is het quotiënt van de gemiddelde bedieningstijd en de gemiddelde tussenaankomsttijd.

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$$

De gemiddelde bedieningstijd =  $1/\mu$ .

De gemiddelde tussenaankomsttijd =  $1/\lambda$ .

Daarnaast wordt er aangenomen dat  $\rho < 1$ . Het aantal wachtende zal niet onbeperkt groeien. De gemiddelde bedieningstijd zal kleiner moeten zijn dan de gemiddelde tussenaankomsttijd.

De evenwichtsverdeling van het aantal aanwezige klanten is een geometrische verdeling.

$$\rho_j = (1 - \rho)\rho^j \quad \text{voor } j = 0, 1, \dots$$

En de fractie dat een bediende bezet is, is  $\rho$ .

Het aantal gemiddelde klanten in het systeem is:

$$L = \frac{\rho}{1 - \rho}$$

Door gebruik te maken van de formule van Little  $L_q = \lambda W_q$  leidt tot de volgende wachttijdformules:

$$W = \frac{1}{\mu(1 - \rho)} \quad (\text{gemiddelde verblijftijd per klant})$$

$$W_q = \frac{\rho}{\mu(1 - \rho)} \quad (\text{gemiddelde wachttijd per klant})$$

$$L_q = \frac{\rho^2}{1 - \rho} \quad (\text{gemiddelde rijlengte})$$

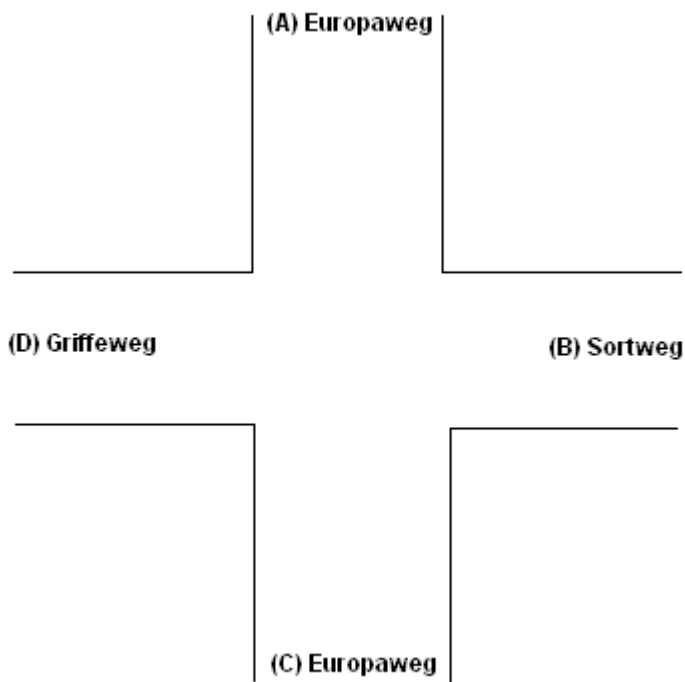
De wachtkans wordt gegeven door:

$$W_q(x) = 1 - \rho e^{-\mu(1-\rho)x}$$

## 2.5 Simulatie en Rapportage

Met behulp van de data van Het Groene Golf Team wordt voor het gedrag van verkeer op rotondes en op kruispunten met verkeerslichten een simulatie model opgesteld. Door middel van een zelfgeschreven simulatieprogramma in een programmeertaal zou dit kunnen worden gesimuleerd. Het gaat om een kruispunt in Groningen, zie figuur 21.

**Figuur 21 Kruispunt Groningen**



Hierbij wordt onderscheid gemaakt in vier wegen die verbonden zijn met het kruispunt. Ieder voertuig kan een keuze maken uit drie richtingen. Bijvoorbeeld de voertuigen die vanuit A komen, kunnen naar B, C, en D. In totaal zijn er dus 12 mogelijke routes.

De data bestaat uit gegevens van de avondspits met een tijdseenheid van één uur. Deze data wordt weergegeven in de tabel van figuur 22.

**Figuur 22 Data kruispunt Groningen**

Van	Naar	Aantal voertuigen
<b>A</b>	<b>B</b>	311
	<b>C</b>	834
	<b>D</b>	218
<b>B</b>	<b>A</b>	484
	<b>C</b>	297
	<b>D</b>	267
<b>C</b>	<b>A</b>	857
	<b>B</b>	44
	<b>D</b>	134
<b>D</b>	<b>A</b>	165
	<b>B</b>	291
	<b>C</b>	169
<b>Totaal</b>		4071

Voor ieder van de vier wegen, die aan dit kruispunt grenst, wordt het aantal voertuigen dat het kruispunt benaderd en verlaat weergegeven in figuur 23.

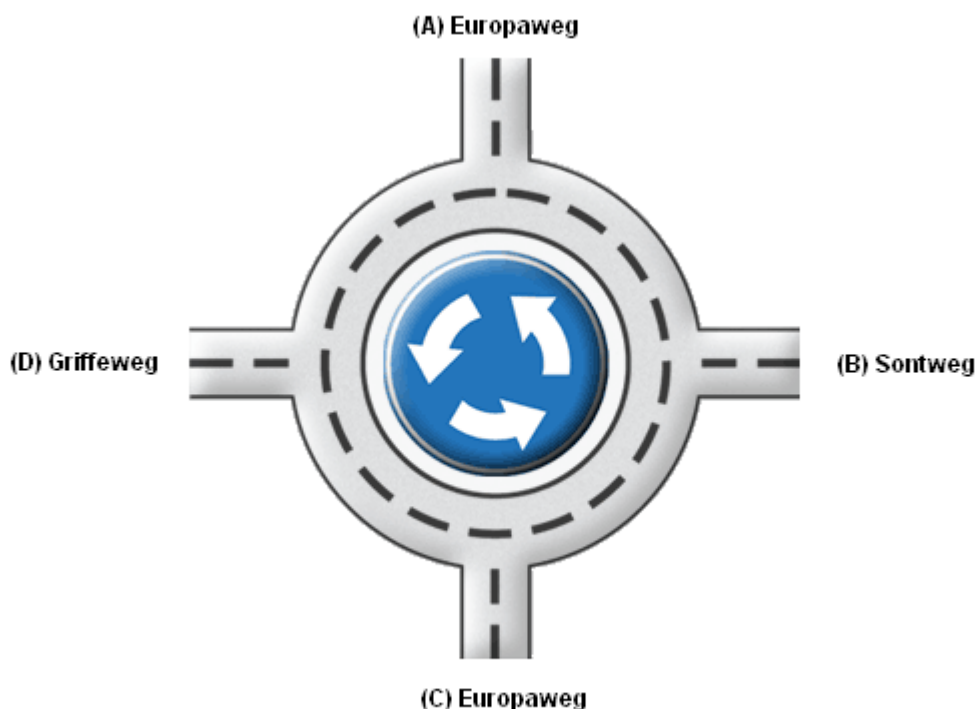
**Figuur 23 Rate in - Rate out kruispunt Groningen**

	Uit	In
<b>A</b>	1363	1506
<b>B</b>	1048	646
<b>C</b>	1035	1300
<b>D</b>	625	619
<b>Totaal</b>	4071	4071

## 2.5.1 Simulatiemodel toegepast op een rotonde in Groningen

In dit model wordt aangenomen dat het kruispunt in Groningen, zoals beschreven is in paragraaf 2.5, een rotonde is, zie figuur 24.

**Figuur 24** Kruispunt Groningen als rotonde



De werking van een rotonde wordt als gegeven ingevoerd in de simulatie. Een tabel beschrijft de werking ervan en tevens wordt door een matrix bepaald welke rijen zich kunnen verplaatsen. De matrix kan er bijvoorbeeld als volgt uit zien, zie figuur 25.

**Figuur 25** Matrix met gegeven toestanden

	<i>AB</i>	<i>AC</i>	<i>AD</i>	<i>BA</i>	<i>BC</i>	<i>BD</i>	<i>CA</i>	<i>CB</i>	<i>CD</i>	<i>DA</i>	<i>DB</i>	<i>DC</i>
<i>A</i>	1	1	1	1			1			1		
<i>B</i>	1			1	1	1		1			1	
<i>C</i>		1			1		1	1	1			1
<i>D</i>			1			1			1	1	1	1

Het getal één in de matrix betekent dat de voertuigen het traject kunnen rijden dat aangegeven staat in de kolom.



Nu kan een initialisatie van de simulatie gemaakt gaan worden. Voor een simulatieduur van  $T$  tijdseenheden wordt van tevoren alle events bepaald die plaatsvinden. Dat zijn: Een voertuig komt aan die een bepaald traject wilt afleggen, het verkeer kan doorrijden, het verkeer moet wachten.

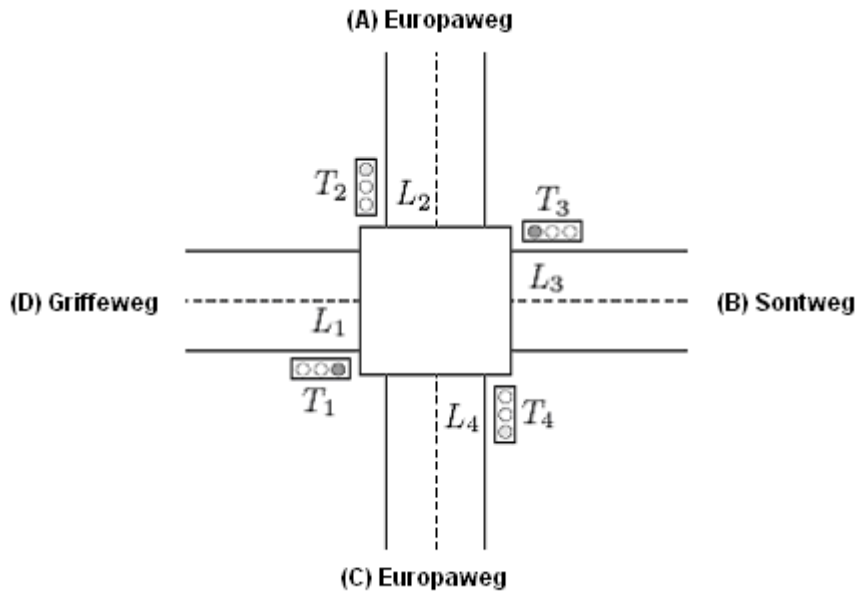
Als basis wordt het M/M/1 wachttijdmodel gebruikt, dit model staat beschreven in paragraaf 2.4.1. De aankomsttijden van de voertuigen is te bepalen aan de hand van het Poisson proces waarmee de voertuigen arriveren. Dat betekent namelijk dat de tussentijd exponentieel verdeeld is. Laat  $t = 0$ , dan komt het eerste voertuig aan na een tijd die exponentieel verdeeld is. Deze tussentijd wordt  $a$  genoemd, dan komt het eerste voertuig aan op tijdstip  $t = a$ . Trek vervolgens na een tussentijd, noem deze  $b$ , dan komt het tweede voertuig aan op tijdstip  $t = a + b$ . Deze procedure moet gedaan worden voor ieder traject. In totaal zijn er 12 trajecten. Het is nuttig om te kijken hoe dit systeem zich gedraagt.

Als alle events bepaald zijn, kan door de lijst met events heen gelopen worden en alle events in volgorde van tijd afhandelen. Bij de aankomst van een voertuig wordt deze in de rij geplaatst, waardoor een variabele opgehoogd wordt. Die het aantal voertuigen representeert die staan te wachten op rijbaan A, B, C, en respectievelijk D. De daadwerkelijke verplaatsingen van het verkeer verloopt via vergelijkingen van het Cellular Automata model, dit model staat beschreven in paragraaf 2.1.

## 2.5.2 Simulatiemodel toegepast op een kruispunt met verkeerslichten in Groningen

In dit model wordt aangenomen dat het kruispunt in Groningen, zoals beschreven is in paragraaf 2.5, een kruispunt met verkeerslichten is, zie figuur 26.

**Figuur 26 Kruispunt Groningen met verkeerslichten**



De werking van de verkeerslichten wordt als gegeven ingevoerd in de simulatie. Een tabel beschrijft de werking ervan en tevens wordt door een matrix bepaald welke rijen zich kunnen verplaatsen als een bepaald verkeerslicht op groen staat. Voor het gemak wordt er vanuit gegaan dat er een toestand is waarbij voertuigen uit de rij vertrekken (i.e., groen) en waarbij voertuigen stil staan voor het verkeerslicht (i.e., rood). De kleur oranje wordt buiten beschouwing gelaten. De matrix kan er bijvoorbeeld als volgt uit zien, zie figuur 27.

**Figuur 27 Matrix met gegeven toestanden**

	<i>AB</i>	<i>AC</i>	<i>AD</i>	<i>BA</i>	<i>BC</i>	<i>BD</i>	<i>CA</i>	<i>CB</i>	<i>CD</i>	<i>DA</i>	<i>DB</i>	<i>DC</i>
<i>A</i>		1	1				1	1				
<i>B</i>				1		1					1	1
<i>C</i>		1	1				1	1				
<i>D</i>				1		1					1	1

	<i>AB</i>	<i>AC</i>	<i>AD</i>	<i>BA</i>	<i>BC</i>	<i>BD</i>	<i>CA</i>	<i>CB</i>	<i>CD</i>	<i>DA</i>	<i>DB</i>	<i>DC</i>
<i>A2</i>	1								1			
<i>B2</i>					1					1		
<i>C2</i>	1								1			
<i>D2</i>					1					1		

Het getal één in de matrix betekent dat wanneer het verkeerslicht van de rij dat op groen staat. De voertuigen het traject kunnen rijden dat aangegeven staat in de kolom. Op iedere rijbaan staan twee verkeerslichten. In dit geval een verkeerslicht om rechtsaf en tegelijkertijd rechtdoor te rijden. En een ander verkeerslicht, aangegeven met A2, B2, C2, en D2, om het verkeer naar links te laten gaan. Er zijn in totaal 8 verkeerslichten waarvan de werking beschreven worden in een vector. De duur van het groene licht wordt vastgelegd in een vector  $g = (g_1, \dots, g_n)$  en de duur van het rode licht in de vector  $r = (r_1, \dots, r_n)$ . In dit geval geldt dus dat  $n = 8$ . De vectoren  $g$  en  $r$  moeten zodanig gekozen worden dat er geen conflicten ontstaan. Bijvoorbeeld het kan niet zo zijn dat het eerste (A) en tweede (B) verkeerslicht tegelijkertijd op groen staan, want bij B rijden er voertuigen die niet kunnen rijden als A op groen staat (zie de matrix).

Nu kan een initialisatie van de simulatie gemaakt gaan worden. Een aantal verkeerslichten worden op groen gezet en de rest op rood. Voor een simulatieduur van  $T$  tijdseenheden wordt van te voren alle events bepaald die plaatsvinden. Dat zijn: voertuig komt aan die een bepaald traject wilt afleggen, verkeerslicht  $X$  springt op groen, verkeerslicht  $X$  springt op rood.

Als basis wordt het M/M/1 wachttijdmodel gebruikt, dit model staat beschreven in paragraaf 2.4.1. De aankomsttijden van de voertuigen is te bepalen aan de hand van het Poisson proces waarmee de voertuigen arriveren. Dat betekent namelijk dat de tussentijd exponentieel verdeeld is. Laat  $t = 0$ , dan komt het eerste voertuig aan na een tijd die exponentieel verdeeld is. Deze tussentijd wordt  $a$  genoemd, dan komt het eerste voertuig aan op tijdstip  $t = a$ . Trek vervolgens na een tussentijd, noem deze  $b$ , dan komt het tweede voertuig aan op tijdstip  $t = a + b$ . Deze procedure moet gedaan worden voor ieder traject. In totaal zijn er 12 trajecten. De events voor de verkeerslichten wordt geheel bepaald door de vectoren  $g$  en  $r$ . Laat  $t = 0$ , en laat bijvoorbeeld A op rood staan. Op tijdstip  $t = r_1$  spring A op groen, en op tijdstip  $t = r_1 + g_1$  springt deze weer op rood. Deze procedure voor het bepalen van de events voor de verkeerslichten moet herhaald worden voor alle verkeerslichten. De tijden dat het verkeerslicht op rood en groen staat is van te voren vastgelegd.

Het is nuttig om te kijken hoe dit systeem zich gedraagt. Door de tijden te veranderen dat een verkeerslicht op rood en op groen staat. De Europaweg is een vrij drukke weg om bijvoorbeeld hier de stoplichten van A en C langer op groen in te stellen en korter op rood.

Als alle events bepaald zijn, kan door de lijst met events heen gelopen worden en alle events in volgorde van tijd afhandelen. Bij de aankomst van een voertuig wordt deze in de rij geplaatst, waardoor een variabele opgehoogd wordt. Die het aantal voertuigen representeert die staan te wachten op rijbaan A, B, C, en respectievelijk D. Als een verkeerslicht op groen springt, dan worden er  $K$  voertuigen per seconden doorgelaten. Iedere  $1/K$  seconden is er een nieuw event, die ervoor zorgt dat een voertuig uit de rij vertrekt. Dat houdt dus in dat bij het afhandelen van het groene verkeerslicht, eerst wordt gekeken of er een voertuig uit de rij gehaald kan worden en daarna meteen een event scheduler na  $1/K$  seconden. Na de  $1/K$  seconden vertrekt er weer een voertuig uit de rij, waardoor de variabele die de rijlengte representeert, verlaagd wordt met één voertuig. Mocht er een voertuig arriveren tijdens een groene periode van het verkeerslicht en de rij is leeg, dan kan dit voertuig gewoon doorrijden. Uiteraard wordt er gestopt met het scheduler van vertrekkende voertuigen zodra het verkeerslicht op rood springt.

### 3 Conclusies + Aanbevelingen

***Zijn er modellen die het gedrag van het verkeer beschrijven op rotondes en op kruispunten met verkeerslichten?***

***Zo ja welk model is het meest geschikt voor dit probleem?***

***Verloopt de doorstroming van het verkeer beter op rotondes dan op kruispunten met verkeerslichten?***

In dit onderzoek is aandacht besteed aan diverse wiskundige modellen die de verkeersdoorstromingen beschrijven met betrekking tot knooppunten in verkeersnetwerken. Vooral is er aandacht besteed aan het Cellular Automata model toegepast op rotondes en een optimalisatiemodel voor kruispunten met verkeerslichten. Daarnaast is er een model besproken op basis van de theorie van wachtrijen. Bij al deze modellen is aangetoond hoe de relatie tussen de rijlengtes, van het aantal wachtende voertuigen, en de dichtheid van het verkeer eruit ziet voor verschillende tijdstippen.

Ook is er aandacht besteed aan eigen ontwikkelde simulatiemodellen zowel voor rotondes als voor verkeerslichten. Deze modellen zijn een aanpassing van het oorspronkelijke M/M/1 wachttijdmodel. Waarbij gebruik gemaakt werd van de wachttijdtheorie toegepast op een kruispunt in Groningen. Het eigen model voor verkeerslichten houdt tevens rekening mee met de tijdsduur dat een verkeerslicht op groen en op rood staat.

Door middel van een zelfgeschreven simulatieprogramma in een programmeertaal zou dit eigen model kunnen worden gesimuleerd. Als basis kan een C++ code, dat gerefereerd is in [3] bladzijde 411, zowel voor rotondes als voor verkeerslichten opgesteld worden. Uit deze resultaten van de simulatie kunnen conclusies worden getrokken hoe de doorstroming van het verkeer verloopt op rotondes als voor kruispunten met verkeerslichten. Het is nuttig om te kijken hoe deze systemen zich gedragen. Bijvoorbeeld door de tijden te veranderen dat een verkeerslicht op rood en op groen staat.

Verwant aan de vorming van rijlengtes is de doorstroming van het verkeer. Bij een grotere dichtheid hoort een lagere doorstroming van het verkeer. Ook zorgt asociaal rijgedrag voor een mindere doorstroming van het verkeer.

## 4 Referenties

- [1] Chopard, B., Dupuis, A. , Luthi, P.; *A cellular automata model for urban traffic and its application to the city of Geneva*; University of Geneva
- [2] Schutter, B. de, Moor, B. de; *Optimal traffic light control for a single intersection*; K.U. Leuven
- [3] Tijms, H.: *Operationele analyse een inleiding in modellen en methoden*; Epsilon Uitgaven, Utrecht
- [4] <http://www.anwb.nl/verkeer/nieuws-en-ips/archief,/nederland/2008/november/Verkeerslichten-irriteren-weggebruikers.html>
- [5] [http://www.swov.nl/rapport/Factsheets/NL/Factsheet\\_Rotondes.pdf](http://www.swov.nl/rapport/Factsheets/NL/Factsheet_Rotondes.pdf)
- [6] [http://nl.wikipedia.org/wiki/Rotonde\\_\(verkeer\)](http://nl.wikipedia.org/wiki/Rotonde_(verkeer))
- [7] <http://nl.wikipedia.org/wiki/Verkeerslicht>

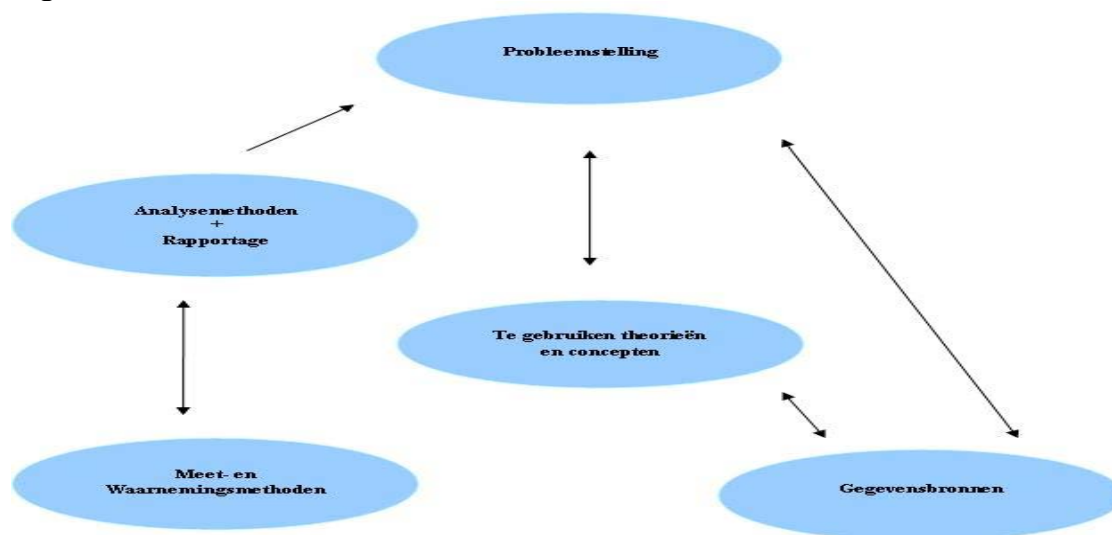
## 5 Bijlagen

### 5.1 Beschrijving onderzoekopzet algemeen

#### 5.1.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de methodologie, die ontwikkeld is door De Leeuw (2001), beschreven. Hij stelt dat methodologisch bekeken een aanpak van een onderzoek niet meer is dan een stel samenhangende beslissingen. Deze beslissingen worden door De Leeuw voorgesteld als de ballen van de ballentent, zie figuur 28. De verschillende ballen zijn aan elkaar gerelateerd en de beslissingen moeten dan ook in samenhang worden genomen. Zo dienen de theoretische begrippen (dat zijn de voornaamste denkinstrumenten) te worden gekozen met het oog op de probleemstelling. Maar anderzijds kunnen probleemstellingen niet worden geformuleerd zonder gebruik te maken van concepten. Gegevensbronnen moeten worden gekozen in het licht van de vraagstelling. Probleemstelling en theoretisch kader vormen samen het hart van de ballentent. De overige drie ballen vormen de aanpak in engere zin.

**Figuur 28 De Ballentent**



*Bron: Leeuw, A.C.J. de, Een boekje over bedrijfskundige methodologie, Assen/Maastricht, Van Gorcum 2001, blz. 88.*

### 5.1.2 Probleemstelling

De vraagstelling staat in verband met het uiteindelijke doel van het onderzoek: het vinden van oplossingen voor het probleem.

Probleemstelling bestaat uit:

- *Doel*  
Hier wordt vastgelegd voor wie het onderzoek gedaan wordt. Wat er voor hen uitkomt en waarom dat voor hen van belang is. Het gaat vooral om de relevantie van het onderzoek.
- *Vraagstelling*  
Hier wordt de hoofdvraag geformuleerd die bij die doelstelling aansluit.
- *Randvoorwaarden*  
Deze geven de beperkingen aan waaraan onderzoeksresultaten en methoden onderhevig zijn. Daaronder vallen ook de eisen en de voorwaarden die de klant ten aanzien van het onderzoek en de resultaten stelt.  
Een onderzoek dient nauwkeurig afgebakend te worden. Enerzijds is dit noodzakelijk omdat het gevraagde kennisproduct op een doelmatige en effectieve wijze moet worden geproduceerd. Anderzijds omdat voor een afstudeeropdracht maar een beperkte onderzoekstijd ter beschikking staat.

Via de rapportage worden de resultaten van het onderzoek aan de opdrachtgever gepresenteerd. Een belangrijk punt vormt ook de afweging van geheimhouding en vertrouwelijkheid. De randvoorwaarden omvatten op dat gebied de afspraken van het onderzoek.

### 5.1.3 Te gebruiken theorieën en concepten

Bij de keuze van de theoretische concepten spelen twee overwegingen een rol. Enerzijds moeten ze in staat stellen de problematiek werkelijk goed te begrijpen: duidelijk, precies en volledig aangeven waar het onderzoek om begonnen is. Anderzijds moeten ze bijdragen aan de onderzoekbaarheid. Ze moeten dus voldoen aan de eisen voor in het bijzonder conceptuele definities en/of conceptuele modellen.

### 5.1.4 Gegevensbronnen

Om onderzoek te kunnen uitvoeren zijn gegevens nodig. Er zijn zes soorten bronnen waar gegevens vandaan gehaald kunnen worden: documenten, media, de werkelijkheid (het 'veld'), de nagebootste werkelijkheid, databanken en de ervaring van de onderzoekers. Bronselectie is zeer belangrijk bij de opzet van een onderzoek. Het gaat er immers om goede gegevens te verkrijgen waarmee de vraagstelling beantwoordt kan worden.



### 5.1.5 Meet- en waarnemingsmethoden + Analysemethoden

De meetprocedure begint bij het conceptualiseren van de begrippen, loopt via de operationalisering in concrete begrippen en de concrete verzameling van de gegevens tot de verwerking van het al dan niet cijfermatig materiaal.

Als laatste stap in het onderzoek moet het verkregen materiaal worden geselecteerd, geanalyseerd en gerapporteerd.

Uit het ruwe materiaal wordt met verwerking en analyse het juiste en relevante materiaal afgeleid.

Hieruit volgen de conclusies en de aanbevelingen.

Enkele analysemethoden kunnen zijn:

- Statistische hulpmiddelen;
- Simulatie;
- Schematiseringen.