Prestatieanalyse van de Turborotonde

Systematische benadering van de relatie tussen geometrisch ontwerp en capaciteit

A.S. van Beinum

Den Haag, april 2007

TU Delft

Witteveen + Bos

Prestatieanalyse van de Turborotonde

Systematische benadering van de relatie tussen
geometrisch ontwerp en capaciteit

Datum: april 2007

Student: A.S. van Beinum
E: beinum@gmail.com
M: 06 1132 1901

Studierichting: Civiele Techniek
Transport & Planning

Studentnummer TU Delft: 1187244

Afstudeercommissie:

Prof.dr.–ing I.A. Hansen	TU Delft (voorzitter afstudeercommissie)
Ir. L.G.H. Fortuijn	TU Delft (dagelijks begeleider)
Ing. E. Jongenotter	Witteveen+Bos (begeleider)
Prof.dr.ir. S.P. Hoogendoorn	TU Delft (sectie Transport & Planning)
Ir. L.J.M. Houben	TU Delft (sectie Structural Engineering)

Voorwoord

Voor u ligt mijn afstudeerrapport, getiteld: "Prestatieanalyse van de Turborotonde - Systematische benadering van de relatie tussen geometrisch ontwerp en capaciteit". Dit rapport is het resultaat van mijn afstudeeronderzoek, dat is uitgevoerd bij Witteveen+Bos, ter afronding van mijn studie Civiele Techniek aan de TU Delft.

Tijdens het zoeken naar een leuk en geschikt onderwerp voor mijn afstuderen, kwam ik na een aantal gesprekken met onder andere Prof. Bovy en Prof. Hansen uit op het onderwerp rotondes. In eerste instantie leek het moeilijk om hier een interessant onderzoek van te maken, tot ik in gesprek kwam met de heer Bertus Fortuyn van Provincie Zuid-Holland en een afstudeerplek aangeboden kreeg van Witteveen+Bos. Dit maakte mij enthousiast en hierna duurde het niet lang tot mijn werkplan op tafel lag.

Gedurende mijn onderzoek heb ik constant getracht een combinatie te maken tussen concrete, praktische verkeerskunde en een degelijke statistische, wiskundige onderbouwing. Dank gaat dan ook uit naar Erik Jongenotter en Serge Hoogendoorn voor hun bijdrage hierin.

Een belangrijk doel dat ik wilde bereiken met mijn afstuderen, was het leveren van een nuttig product dat later door anderen kan worden gebruikt en niet ergens onder in een kast verdwijnt. Aan de hand van toezeggingen dat de resultaten uit deze studie ook daadwerkelijk gebruikt zullen worden voor de CROW publicatie over turborotondes, kan ik stellen dat ik mijn doelstelling heb gehaald.

Bijzondere dank gaat uit naar Bertus Fortuyn voor de zeer goede begeleiding gedurende mijn afstuderen. Zijn input en adviezen hebben zeker bijgedragen aan kwaliteit van deze studie.

Ten slotte wil ik Witteveen+Bos bedanken voor het faciliteren van mijn afstuderen en het bieden van een werkplek waar ik met plezier heb gewerkt. Daarnaast wil ik ook de heer Lambert Houben en alle andere bedanken die mij hebben geholpen met het tot stand brengen van dit eindproduct.

Den Haag, april 2007
Aries van Beinum

Samenvatting

Dit rapport beschrijft verschillende rekenmethodes voor het bepalen van de rotondecapaciteit van enkel- en meerstrooksrotondes die tot op heden zelden werden toegepast in Nederland. Deze studie is gericht op het toepasbaar maken van deze formules voor de Nederlandse verkeerssituatie, en resulteert dan ook in een complete set, gekalibreerde en gevalideerde, parameters die gelden voor deze situatie.

Het eerste deel van deze studie bestaat uit een inventarisatie van de beschikbare analytische modellen die geschikt zijn voor het bepalen van de capaciteit van een rotonde. Dit resulteerde in een selectie van twee verkeersstroom- en twee hiaatacceptatiemodellen. De parameters voor deze modellen zijn op twee manieren gekalibreerd voor de Nederlandse situatie, aan de hand van meetgegevens uit de praktijk.
De eerste manier is een afzonderlijke schatting waarbij de verschillende parameters individueel, met behulp van wiskundige methodes, zijn bepaald aan de hand van de data. De tweede methode is een gezamenlijke schatting waarin de parameters worden geschat aan de hand van gemeten intensiteiten en capaciteiten. Hierbij is gebruik gemaakt van een kleinste kwadraten methode.

Het tweede deel bestaat uit het maken van een simulatiemodel. Hierbij is gebruik gemaakt van het computerprogramma VISSIM. Dit model is gebruikt om de soms tekortschietende hoeveelheid meetgegevens aan te vullen. Aan de hand van deze extra gegevens konden invloeden als: Breedte van de middengeleider, snelheid op de rotonde en de richtingsverdeling van het verkeer, nader worden onderzocht.

In het laatste deel van deze studie is de kennis, die is opgedaan in de eerste twee delen, gebruikt om een geometrisch ontwerp te maken voor een bestaande verkeerssituatie.

Uit deze studie is gebleken dat er extra metingen, of nauwkeurigere simulaties, nodig zijn om de validatie compleet te maken.

De uiteindelijke waarden voor de parameters die het resultaat zijn van deze studie zijn weergegeven in de onderstaande tabellen.

Modelparameters enkelstrooksrotonde					
Parameters Bovy			Parameters hiaatacceptatie		
Rotondediameter	37	50	Rotondediameter	37	50
C_0	1700	1850	t_C	3,1	3,4
a	0,91	0,95	t_F	2,1	1,9
b	0,20	0,00	t_M	1,9	1,9

Modelparameters standaard turborotonde							
Parameters Bovy				Parameters hiaatacceptatie			
Type toerit	2 rot. str.	1 rot. str. Li	1 rot. str. Re	Type toerit	2 rot. str.	1 rot. str. Li	1 rot. str. Re
C_0	-	1800	1750	t_{C_binnen}	3,0		
a	-	0,95	0,94	t_{C_buiten}	3,2	2,9	3,0
b	-	0,00	0,00	t_F	2,0	2,0	2,0
				t_M	1,9	1,9	1,9

Inhoudsopgave

1 INLEIDING 5

2 PROBLEEMANALYSE 6

2.1 HUIDIGE SITUATIE 6

2.2 GEWENSTE SITUATIE 6

2.3 PROBLEEMSTELLINGEN 6

3 AANPAK 7

3.1 DOELSTELLINGEN 7

3.2 WERKWIJZE 7

4 ANALYTISCH MODEL 8

4.1 ALGEMEEN 8

4.2 BESCHIKBARE MODELLEN 9

4.3 PARAMETERS 18

4.4 BESCHIKBARE DATA 32

4.5 RESULTATEN 38

4.6 SAMENVATTING VAN DE RESULTATEN 51

4.7 CONCLUSIES ANALYTISCH MODEL 53

5 SIMULATIE MODEL 54

5.1 ALGEMEEN 54

5.2 MODELLEN 60

5.3 KALIBRATIE EN VALIDATIE 66

5.4 TE ONDERZOEKEN ONDERWERPEN 70

5.5 ONDERZOEKSRESULTATEN 74

5.6 CONCLUSIES SIMULATIEMODEL 81

6 GEOMETRISCH ROTONDEONTWERP 82

6.1 ALGEMEEN 82

6.2 INVENTARISATIE 84

6.3 ROTONDEKEUZE 85

6.4 DIMENSIONERING ONTWERPELEMENTEN 89

7 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN 93

7.1 CONCLUSIES 93

7.2 AANBEVELINGEN 94

8 LITERATUUR 95

BIJLAGEN

BIJLAGE A: GEDETAILLEERDE RESULTATEN AFZONDERLIJKE SCHATTING

BIJLAGE B: GEDETAILLEERDE GEZAMENLIJKE SCHATTING

BIJLAGE C: GEDETAILLEERDE KALIBRATIERESULTATEN SIMULATIEMODEL

BIJLAGE D: GEDETAILLEERDE ONDERZOEKSRESULTATEN SIMULATIEMODEL

BIJLAGE E: TEKENINGEN 1:500 VAN GEOMETRISCH ROTONDEONTWERP

1 Inleiding

Sinds de jaren 80 heeft het toepassen van rotondes een enorme vlucht genomen. Dit was te danken aan de grote voordelen op het gebied van capaciteit en verkeersveiligheid ten opzichte van andere kruispuntvormen. Op plaatsen waar de capaciteit van een enkelstrooksrotonde tekort schoot werden meerstrooksrotondes toegepast. Een groot nadeel van een meerstrooksrotonde is het aantal conflictpunten tussen automobilisten als gevolg van het moeten wisselen van rijstrook op de rotonde wat de capaciteit en verkeersveiligheid niet ten goede komt. Om dit probleem te verminderen wordt tegenwoordig in plaats van een conventionele meerstrooksrotonde vaak een turborotonde toegepast. Een turborotonde is een meerstrooksrotonde met een spiraalvorm, waardoor automobilisten op de rotonde niet van rijbaan hoeven te wisselen. Figuur 1-1 toont enkele praktijkvoorbeelden van deze verschillende soorten rotondes.

Figuur 1-1: Links een enkelstrooks rotonde, midden een tweestrooks rotonde en rechts een turborotonde

Er is echter weinig bekend over de werkelijke capaciteit van turborotondes. Er is dan ook behoefte aan een nieuwe rekenmethode die geschikt is om de capaciteit van een turborotonde te kunnen bepalen.
Voor het bepalen van de capaciteit van conventionele rotondes zijn inmiddels twee soorten rekenmodellen ontwikkeld, analytische modellen en simulatiemodellen. In deze studie wordt beschreven hoe de verschillende rekenmodellen kunnen worden aangepast, zodat deze toepasbaar zijn voor turborotondes. Om een concrete toepassing te demonstreren van de nieuwe rekenmodellen omvat deze studie ook het maken van een geometrisch ontwerp voor een rotonde in een praktijksituatie.

De opbouw van dit rapport is als volgt; in hoofdstuk 2 komt een beschouwing van de problematiek aan de orde. Een overzicht van de beschikbare capaciteitsformules en de kalibratie hiervan wordt beschreven in hoofdstuk 4. hoofdstuk 5 beschrijft de ontwikkeling van het rotondemodel in VISSIM en in hoofdstuk 6 wordt het geometrisch ontwerp van de nieuwe turborotonde behandeld. Ten slotte worden in hoofdstuk 7 conclusies en aanbevelingen gegeven.

2 Probleemanalyse

De probleemanalyse bestaat uit een beschrijving van de huidige situatie en de gewenste situatie. Dit resulteert in een probleemstelling.

2.1 Huidige situatie

Wanneer men een (turbo)rotonde wil ontwerpen is het noodzakelijk te weten of het ontwerp, na aanleg, voldoet aan de gestelde eisen betreffende de verkeersafwikkeling. Met andere woorden: Is de capaciteit van de rotonde toerijkend om het verkeersaanbod te kunnen verwerken?
Tot op heden worden de toeritcapaciteiten van turborotondes, in al zijn verschillende verschijningsvormen, berekend met een betrekkelijk eenvoudig rekenmodel. Vanwege het relatief jonge bestaan van de turborotonde zijn de uitkomsten van deze modellen nooit uitvoerig getoetst aan de praktijk. Daarnaast is het de vraag of er inmiddels geen betere rekenmethoden zijn ontwikkeld die nauwkeurigere resultaten geven dan, het tot nu toe gebruikte, eenvoudige rekenmodel.

2.2 Gewenste situatie

De turborotonde wint aan populariteit en wordt op steeds grotere schaal toegepast. Hierdoor is er vraag naar een eenvoudig maar een vooral betrouwbare methode voor het bepalen van de capaciteit. De capaciteit van een rotonde wordt bepaald door de capaciteit van de verschillende toeritten. Er is dus vraag naar een analytisch model waarmee, met behulp van formules, de capaciteit van de rotondetoeritten kan worden bepaald. Daarnaast is er behoefte aan een gekalibreerd model van een turborotonde in het verkeerssimulatieprogramma VISSIM om inzicht te krijgen in de werking van de turborotonde onder verschillende omstandigheden.

2.3 Probleemstellingen

De bovengenoemde probleemomschrijving kan worden samengevat in de volgende probleemstellingen:

1. Er is gebrek aan een eenvoudig en betrouwbaar analytisch rekenmodel voor het bepalen van de capaciteit van turborotondes.
2. Er is gebrek aan een simulatiemodel voor de verkeersafwikkeling op turborotondes.

3 Aanpak

3.1 Doelstellingen

Om tot een oplossing van de probleemstelling te komen zijn de volgende doelen gesteld:

1. Het geven van een advies betreffende het gebruik van een bestaand capaciteitsmodel, in combinatie met voor de Nederlandse situatie representatieve parameters, voor het berekenen van toeritcapaciteiten op turborotondes.
2. Het maken van een goed werkend model voor een turborotonde in het simulatieprogramma VISSIM.

Om deze zaken een praktische invulling te geven zal een geometrisch ontwerp worden gemaakt van een turborotonde voor een bestaande situatie.

3.2 Werkwijze

Het zwaartepunt van deze studie ligt in de ontwikkeling van het analytische rekenmodel en het simulatiemodel.

Het onderzoek is gestart met een inventarisatie naar de stand van zaken aangaande het berekenen van de toeritcapaciteiten van rotondes. Hieruit zijn een aantal capaciteitsformules en een set aan data, van enkelstrooks- en turborotondes, naar voren gekomen. Na deze inventarisatie zijn de parameters van de verschillende capaciteitsformules gekalibreerd voor de Nederlandse situatie. Vanwege de geringe beschikbaarheid van turborotondedata is de conventionele enkelstrooksrotonde als basis genomen voor de kalibratie, er van uit gaande dat het rijgedrag op enkelstrooksrotondes in de basis gelijk is aan dat op turborotondes.

De tweede stap in het onderzoek is het maken van een verkeerssimulatiemodel voor een turborotonde in VISSIM. Als basis hiervoor dient, net als bij de capaciteitsformules, een model van een conventionele enkelstrooksrotonde. Dit model is gebouwd met behulp van al aanwezige kennis bij Witteveen+Bos, TU Delft en Provincie Zuid-Holland. Ter kalibratie zijn de instellingen van VISSIM aangepast, zodanig dat de resultaten overeenkomen met de gemeten resultaten.

De derde en laatste stap in deze studie is het toepassen van de resultaten van de eerste twee stappen in het maken van een geometrisch ontwerp van een turborotonde voor een bestaande praktijksituatie.

4 Analytisch model

4.1 Algemeen

Voor het bepalen van de toeritcapaciteit van een rotonde zijn verschillende methodes voorhanden die allen zijn gebaseerd op het rijgedrag van automobilisten. Het verschil tussen de methodes zit in het detailniveau waarin dit rijgedrag wordt benaderd. Hierin kan onderscheid worden gemaakt in vier detailniveaus:

- vuistregels;
- verkeersstromen;
- hiaatacceptatie;
- individuele voertuigen

Vuistregels

Wanneer men gebruik maakt van vuistregels wordt verondersteld dat elk conflictpunt tussen de verschillende verkeersstromen een bepaalde capaciteit heeft. De som van het aantal voertuigen op de rotonde en het aantal voertuigen op de desbetreffende toerit moet kleiner zijn dan de capaciteit van het conflictpunt. Vuistregels zullen in deze studie niet worden behandeld.

Verkeersstroom

Binnen de verkeersstroomtheorie wordt aangenomen dat er een verband bestaat tussen de van de rotonde-intensiteit en de van de toeritcapaciteit, al dan niet met invloed van afslaand en langzaam verkeer op de toerit of naastgelegen afrit. Dit verband kan zowel lineair als exponentieel zijn, en wordt bepaald door invloeden als rotondediameter, breedte van de middengeleider en aantalrijstroken op de toerit en de rotonde. Dit soort modellen worden macroscopische modellen genoemd.

Hiaatacceptatie

De hiaatacceptatietheorie benadert de interactie tussen twee verschillende verkeersstromen als volgt: De capaciteit van een toerit wordt bepaald door het aanbod van hiaten in de rotondestroom en de benutting van deze hiaten door het verkeer op de toerit. De parameters die deze interactie beschrijven zijn: Het kritisch hiaat, de volgtijdverdeling van het rotondeverkeer en de gemiddelde oprijvolgtijd van het toeritverkeer. Voor deze parameters worden vaste waarden aangenomen die gelden voor alle voertuigen in de verkeersstroom, hierdoor behoren hiaatacceptatiemodellen tot de macroscopische modellen.

Individuele voertuigen

Naast de macroscopische modellen, waar gekeken wordt naar verkeersstromen, kan er ook gekeken worden naar de verkeersafwikkeling op individueel voertuigniveau. Op dit detailniveau spreekt men van microscopische modellen. Een handige manier voor het verkrijgen van deze gedetailleerde informatie is het uitvoeren van een simulatie. In een simulatie wordt het verkeersafwikkelingproces nagebootst op de computer met behulp van een verkeerssimulatiemodel, bijvoorbeeld VISSIM.

In dit deel van het rapport wordt ingegaan op het vaststellen van de verschillende modelparameters die nodig zijn om de verkeersstroommodellen en de hiaatacceptatiemodellen bruikbaar te maken voor de Nederlandse turborotondes.

Na het vaststellen van deze parameters zullen de uitkomsten van de verkeersstroom- en hiaatacceptatiemodellen worden vergeleken met de uitkomsten van het microscopische model (VISSIM). Het maken van het rotondemodel in VISSIM wordt behandeld in hoofdstuk 5.

4.2 Beschikbare modellen

In dit hoofdstuk zullen de verschillende modellen, die in deze studie zijn gebruikt, nader worden toegelicht. Er wordt onderscheid gemaakt tussen verkeersstroommodellen en hiaatacceptatiemodellen. Een gedetailleerde verklaring van de verschillende parameters wordt gegeven in paragraaf 4.3.

4.2.1 Verkeersstroommodellen

Sinds 1977 zijn er verschillende modellen geïntroduceerd die gebaseerd zijn op de relatie tussen verkeersstromen. Deze modellen waren bedoeld als alternatief voor de modellen gebaseerd op de hiaatacceptatietheorie. Bij verkeersstroommodellen wordt aangenomen dat er een verband bestaat tussen de intensiteit van rotondestroom en de capaciteit van de toerit.

De capaciteitsformule is verkregen door regressieanalyse toe te passen op de intensiteiten van de toeritstroom en de rotondestroom. Voor deze modellen zijn data verzameld bestaande uit de rotonde-intensiteit, de afritintensiteit en de capaciteit van de toerit gedurende periodes van vijf minuten. De capaciteit van de toerit kan dan, in vereenvoudigde vorm, worden geschreven als:

$$C_E = F - f_C \cdot Q_R \qquad (4.1)$$

Hierin is:
C_E = Capaciteit van de toerit [vtg/h]
F = Modelparameter voor het intercept [-]
f_C = Modelparameter voor de helling [-]
Q_R = Qntensiteit van de rotondestroom [vtg/h]

F en f_C zijn afhankelijk van de rotondegeometrie en de eigenschappen van de verkeersstromen. Verkeersstroommodellen worden veel gebruikt en er zijn een groot aantal van deze modellen beschikbaar en deze bevatten allen verschillende geometrische parameters in de vorm van F en f_C.

In deze studie worden twee modellen behandeld:
De capaciteitsformule van Bovy en de capaciteitsformule van Stuwe en Brilon.

Capaciteitsformule van Bovy

De capaciteitsformule van Bovy [1] is de formule die in Nederland op grote schaal wordt toegepast voor het bepalen van de capaciteit van een rotondetoerit. De formule van Bovy is een empirische formule die in Zwitserland is ontwikkeld en is afgestemd op de Zwitserse verkeerssituatie. De formule kan de toeritcapaciteit van zowel enkel- als van tweestrooksrotondes berekenen. In het geval van de tweestrooksrotonde kan er naast tweestrookstoeritten ook gekozen worden voor enkelstrookstoeritten.

Kenmerkend voor de formule van Bovy is de manier waarop met het afslaande verkeer op de afrit, op dezelfde rotondetak als de toerit, wordt omgegaan. Het afslaande verkeer wordt in de vorm van een schijnconflict meegenomen in de formule (term $\alpha \cdot Q_S$) en heeft een negatieve invloed op de capaciteit van de toerit. De mate van deze invloed is afhankelijk van verschillende factoren zoals: gebruik van de richtingaanwijzer, snelheid van afslaande voertuigen, intensiteit van het afslaande verkeer en de breedte van de middengeleider.

De formule van Bovy is als volgt:

$$C_E = \frac{1}{\gamma}\left[1500 - \frac{8}{9}\left(\beta \cdot Q_R + \alpha \cdot Q_S\right)\right] \quad (4.2)$$

Hierin is:
C_E = Capaciteit toerit [pae/uur]
Q_R = Intensiteit rotondeverkeer [pae/uur]
Q_S = Intensiteit afslaand verkeer [pae/uur]
α = Invloed afslaand verkeer [-]
β = Invloed aantal rijstroken op de rotonde [-]
γ = Invloed aantal stroken op de toerit [-]

De formule heeft een aantal onderdelen die ter vereenvoudiging veranderd kunnen worden.
De waarde van 1500 staat voor de toeritcapaciteit wanneer de intensiteit van het rotondeverkeer nul zou zijn. Zoals eerder is aangegeven is deze waarde van toepassing op de Zwitserse situatie. Voor de Nederlandse situatie zal de waarde van 1500 waarschijnlijk niet kloppen. Daarnaast zijn de parameters $1/\gamma$ en 8/9 weg te schrijven.

De formule kan als volgt worden aangepast:
C_0 = 1500 [pae/uur]
a = 8/9*α
b = 8/9*β
γ = wordt ondergebracht in C_0, a en b

De formule van Bovy voor een enkelstrooks toerit en enkelstrooks rotonde wordt:

$$C_E = C_0 - b \cdot Q_R - a \cdot Q_S \quad (4.3)$$

De formule uitgeschreven voor een turborotonde met twee rotondestroken en twee toeritstroken wordt:

$$C_{E,1} = C_0 - b_{licht} \cdot Q_{R,licht} - b_{zwaar} \cdot Q_{R,zwaar} - a_1 \cdot Q_S \quad (4.4)$$

$$C_{E,2} = C_0 - b_I \cdot Q_{R,I} - a_2 \cdot Q_S \quad (4.5)$$

Hierin is:
index 1 = linker rijstrook van de toerit
index 2 = rechter rijstrook van de toerit
index licht = laagste optredende verkeersbelasting op beide rotonde stroken
index zwaar = hoogste optredende verkeersbelasting op beide rotonde stroken
index I is = intensiteit op de binnenste rotondestrook
index U is = intensiteit op de buitenste rotondestrook

Capaciteitsformule van Brilon

Brilon [2] heeft de formule van Siegloch [3] als uitgangspunt gebruikt en heeft op basis van empirisch onderzoek waarden vastgesteld voor de verschillende parameters. Dit empirisch onderzoek is enkel uitgevoerd in Duitsland. De formule van Brilon is geschikt voor het doorrekenen van zowel enkel- als tweestrooksrotondes. Daarnaast heeft de formule ook de mogelijkheid om voor een tweestrooksrotonde te rekenen met enkelstrooks toeritten.

De formule van Brilon is als volgt:

$$C_E = C_0 \cdot e^{-\frac{B}{10000} \cdot Q_R} \tag{4.6}$$

Hierin is:
C_E = Capaciteit van de toerit [pae/uur]
Q_R = Intensiteit rotondeverkeer [pae/uur]
C_0 = Capaciteit van de toerit zonder hinder van rotonde verkeer (nul capaciteit) [pae/uur]
B = Mate van invloed rotondeverkeer [-]

De formule van Brilon houdt geen rekening met het schijnconflict als gevolg van het afslaande verkeer. Deze invloed kan in rekening worden gebracht door hiervoor een extra parameter (*d*) toe te voegen. Met deze parameter kan de relatie worden gelegd tussen de gewogen rotonde-intensiteit en de werkelijke rotonde-intensiteit, als gevolg van het schijnconflict. De relatie wordt als volgt:

$$Q_{RS} = Q_R + d \cdot Q_S \tag{4.7}$$

Hierin is:
Q_{RS} = Gewogen rotonde intensiteit, inclusief schijnconflict [pae/uur]
Q_S = Intensiteit afslaand verkeer naar afrit naast beschouwde toerit [pae/uur]
q_{RS} = Gewogen rotonde intensiteit, inclusief schijnconflict [pae/s]
q_S = Intensiteit afslaand verkeer naar afrit naast beschouwde toerit [pae/s]
d = Invloed van schijnintensiteit en vormgeving rotonde [-]

De formule van Brilon, inclusief invloed van het schijnconflict wordt:

$$C_E = C_0 \cdot e^{-\frac{B}{10000} \cdot Q_{RS}} \tag{4.8}$$

4.2.2 Hiaatacceptatiemodellen

Er zijn verschillende capaciteitsmodellen beschikbaar die gebaseerd zijn op het beschrijven van het hiaatacceptatieproces. De basis voor de meeste modellen is gelegd door Tanner [4]. Troutbeck [5] heeft deze formule later aangepast door een extra parameter toe te voegen die de clustering van de verkeersstroom beschrijft. De formules van Tanner en Troutbeck zijn alleen van toepassing op enkelstrooksrotondes. Fisk [6] en Hagring [7] hebben later, respectievelijk de formules van Tanner en Troutbeck uitgebreid tot capaciteitsmodellen voor meerstrooksrotondes.

In deze studie zijn de volgende vier modellen gebruikt, namelijk de:
1. Capaciteitsformule van Tanner
2. Capaciteitsformule van Troutbeck
3. Capaciteitsformule van Fisk
4. Capaciteitsformule van Hagring

Eerst zal het basisconcept van de hiaatacceptatiemodellen worden behandeld. Daarna volgen de beschrijvingen van de vier, in deze studie gebruikte, hiaatacceptatiemodellen.

Basisconcept

Het basisconcept van een hiaatacceptatiemodel (zoals omschreven door Hagring [7]) is als volgt: Een voertuigbestuurder op de toerit zal invoegen in de verkeersstroom op de rotonde, wanneer er een hiaat (t) optreedt die groter is dan zijn kritisch hiaat (t_C). De grootte van dit kritisch hiaat kan worden gezien als de afweging tussen minimaal tijdverlies en de mate van veiligheid bij het invoegen. Er kan dus worden gesteld dat de hiaatacceptatietheorie is gebaseerd op rijgedrag van individuele voertuigbestuurders.

Voordat dit basisconcept verder kan worden uitgewerkt moeten een aantal rijeigenschappen en basisbegrippen nader worden verklaard.
Rijgedrag is consistent wanneer een voertuigbestuurder altijd hetzelfde kritisch hiaat aanhoudt. Doet hij dit niet, dan is het rijgedrag inconsistent
Rijgedrag is homogeen wanneer voertuigbestuurders zich allemaal op dezelfde manier gedragen. Doen zij dit niet dan is het rijgedrag heterogeen.
Het hiaat tussen twee opeenvolgende voertuigen is gedefinieerd als: de ruimte, uitgedrukt in tijd [s], tussen de achterkant van het eerste voertuig en de voorkant van het volgende voertuig.
De volgtijd van twee opeenvolgende voertuigen is gedefinieerd als: het tijdsverschil [s] tussen de passagemomenten van de achterkant van het eerste voertuig en de achterkant van het volgende voertuig.

Het moge duidelijk zijn dat het kritisch hiaat per automobilist verschilt en daarnaast afhangt van de mate van (on)geduld bij de automobilist. Hierbij valt vooral te denken aan het steeds kleiner worden van het kritisch hiaat, naar mate de automobilist langer staat te wachten.

Bij toepassing van de hiaatacceptatietheorie in capaciteitsformules wordt, ter vereenvoudiging, aangenomen dat het rijgedrag van automobilisten zowel homogeen als consistent is[1]. Hierdoor is het mogelijk om één vaste waarde voor het kritisch hiaat aan te nemen die geldt voor alle voertuigbestuurders.

[1] Troutbeck en Brilon (8. Troutbeck, R.J. and W. Brilon, *Chapter 8: Unsignalized Intersection Theory*, in *Revised Traffic Flow Theory - A State-of-the-Art Report*. 2001.) hebben gewezen op de invloed van deze aanname en zij stellen dat wanneer het rijgedrag heterogeen is, de toeritcapaciteit zal afnemen en wanneer het rijgedrag inconsistent is, de toeritcapaciteit zal toenemen. Wanneer wordt aangenomen dat het gedrag van automobilisten zowel homogeen als consistent is, in plaats van heterogeen en inconsistent, dan zal dit verschil slechts een paar procent zijn.

Naast het kritisch hiaat t_C kan men t_n definiëren als: Het hiaat tussen twee opeenvolgende voertuigen dat groot genoeg is, zodat precies n voertuigen, wachtend in de wachtrij op de toerit, dit hiaat gebruiken om in te voegen in de rotondestroom.

Het aantal voertuigen dat een dergelijk hiaat accepteert is afhankelijk van het kritisch hiaat en de volgtijd van het toeritverkeer. Wanneer wordt aangenomen dat deze volgtijd constant is, kan het model als volgt worden geschreven:

$$t_n = t_C + (n-1) \cdot t_F \tag{4.9}$$

Hierin is:
t_C = Kritisch hiaat [s]
n = Aantal voertuigen dat gebruik maakt van het hiaat [-]
t_F = Oprijvolgtijd van het toeritverkeer

Het aantal voertuigen (N_t) dat een hiaat (t) kan benutten, kan dan worden beschreven door:

$$N_t = 1 + \frac{(t - t_C)}{t_F} \tag{4.10}$$

Het aantal voertuigen (N_t) dient te worden afgerond op hele getallen.

Wanneer de verdeling van hiaten over een bepaalde periode bekend is, kan de capaciteit worden berekend met behulp van vergelijking (4.10). In de hiaatacceptatietheorie wordt in plaats van een hiaatverdeling een volgtijdverdeling gebruikt. Om dit te mogen doen wordt aangenomen dat voertuigen worden behandeld als representatieve punten (zonder fysieke afmetingen).

Capaciteitsformule van Tanner

De formule van Tanner [4] is gebaseerd op de hiaatacceptatietheorie en geldt alleen voor enkelstrooksrotondes. Tanner gaat er van uit dat de volgtijden van het rotondeverkeer verdeeld zijn volgens een bepaalde kansverdeling, gebaseerd op de intensiteit van het rotondeverkeer.

De formule van Tanner is als volgt:

$$C_E = Q_R \cdot \frac{\left(1 - q_R \cdot t_M\right) \cdot e^{-q_R (t_C - t_M)}}{1 - e^{-q_R \cdot t_F}} \tag{4.11}$$

C_E = Capaciteit van de toerit [vtg/h]
Q_R = Intensiteit rotondeverkeer [vtg/h]
q_R = Intensiteit rotondeverkeer in [vtg/s]
t_M = Minimale volgtijd voor voertuigen op de rotonde [s]
t_C = Kritisch hiaat van automobilisten op de toerit [s]

De formule van Tanner houdt, net als de formule van Brilon, geen rekening met het schijnconflict als gevolg van het afslaande verkeer. Ook hier kan de formule eenvoudig worden aangepast door gebruik te maken van de relaties volgens formule 4.7.

De formule van Tanner, inclusief invloed van het schijnconflict wordt:

$$C_E = Q_{RS} \cdot \frac{\left(1 - q_{RS} \cdot t_M\right) \cdot e^{-q_{RS} (t_C - t_M)}}{1 - e^{-q_{RS} \cdot t_F}} \tag{4.12}$$

Capaciteitsformule van Troutbeck

De formule van Troutbeck [5] komt voort uit de formule van Tanner en kan op dezelfde typen rotondes worden toegepast.
Het verschil met de formule van Tanner is de gebruikte volgtijdverdeling voor het rotondeverkeer. Tanner heeft zijn eigen volgtijdverdeling gebruikt en Troutbeck gebruikt de M3 verdeling van Cowan. De M3 verdeling beschrijft de volgtijden iets gedetailleerder dan de volgtijdverdeling van Tanner, door rekening te houden met pelotonvorming in de verkeersstroom. Cowan stelt dat een voertuig "vrij" rijdt wanneer deze een afstand tot zijn voorganger heeft die groter is dan een bepaalde waarde (t_M). Is de afstand tussen zijn voorganger kleiner dan deze waarde, dan rijdt het voertuig in een peloton, ook wel een cluster genoemd. Het percentage vrije voertuigen is van invloed op de capaciteit, omdat wordt aangenomen dat de bruikbare hiaten optreden in het vrije deel van de verkeersstroom, indien t_M kleiner is dan het kritisch hiaat. De M3 verdeling wordt behandeld in paragraaf 4.3.1.

De formule van Troutbeck is als volgt:

$$C_E = 3600 \cdot \frac{\varphi \cdot q_R \cdot e^{-\lambda(t_C - t_M)}}{1 - e^{-\lambda \cdot t_F}} \tag{4.13}$$

$$\lambda = \frac{\varphi \cdot q_R}{1 - t_M \cdot q_R} \tag{4.14}$$

Hierin is:
C_E = Capaciteit toerit [vtg/h]
q_R = Intensiteit rotondeverkeer in [vtg/s]
t_C = Kritisch hiaat van automobilisten op de toerit [s]
t_M = Minimale volgtijd rotondeverkeer [s]
t_F = Oprijvolgtijd toeritverkeer, in peloton invoegen bij wachtrij op toerit [s]
λ = Invloed rotonde-intensiteit op de hiaatgrootte [-]
φ = Percentage vrij voertuigen (ongeclusterd) op rotonde [-]

De formule van Troutbeck houdt, net als de formule van Brilon, geen rekening met het schijnconflict als gevolg van het afslaande verkeer. Ook hier kan de formule eenvoudig worden aangepast door gebruik te maken van de relaties volgens formule (4.7).

De formule van Tanner, inclusief invloed van het schijnconflict wordt:

$$C_E = 3600 \cdot \frac{\varphi \cdot q_{RS} \cdot e^{-\lambda(t_C - t_M)}}{1 - e^{-\lambda \cdot t_F}} \tag{4.15}$$

$$\lambda = \frac{\varphi \cdot q_{RS}}{1 - t_M \cdot q_{RS}} \tag{4.16}$$

Capaciteitsformule van Fisk

De formule van Fisk [6] is een uitbreiding van de formule van Tanner, waardoor deze geschikt wordt voor toepassing op een meerstrooksrotonde.
Kenmerkend voor de methode van Fisk is dat de toeritcapaciteit per strook uitgerekend wordt. Hierbij wordt aangenomen dat het verkeer op de linkerstrook van de toerit invoegt naar de binnenste rotondestrook en daarbij voorrang verleent aan het verkeer op alle rotondestroken. Het verkeer van de rechterstrook van de toerit voegt in naar de buitenste strook van de rotonde en wacht alleen op het verkeer op de buitenste strook van de rotonde. In de praktijk echter, zal het verkeer op de binnenste strook van de rotonde het invoeggedrag van de rechter rijstrook van de toerit beïnvloeden. Om de formule van Fisk toe te kunnen passen moet de verdeling van het rotondeverkeer over de twee rijstroken bekend zijn. Dit is bij turborotondes het geval.

De formule van Fisk, voor twee rotondestroken, is als volgt:

$$C_{E,j} = Q_R \cdot \frac{\prod_{i=1}^{2}\left(1 - q_{R,i} \cdot t_M\right) \cdot e^{-q_{R,i} \cdot t_{C,i}}}{e^{-Q_R \cdot t_M} \cdot \left(1 - e^{-Q_R \cdot t_F}\right)} \qquad (4.17)$$

Hierin is:
$C_{E,j}$ = Capaciteit van de toerit op rijstrook j. [vtg/h]
Q_R = $\Sigma_i q_{R,i}$
$q_{R,i}$ = Intensiteit in [vtg/s] op rotondestrook i. [vtg/s]
t_M = Minimale volgtijd rotondeverkeer [s]
$t_{C,i}$ = Kritisch hiaat van automobilisten op toerit in verkeersstroom op rotondestrook i. [s]
t_F = Oprijvolgtijd toeritverkeer, in peloton invoegen bij wachtrij op toerit [s]

De formule van Fisk houdt, net als de voorgaande formule, geen rekening met het schijnconflict als gevolg van het afslaande verkeer. Ook hier kan de formule eenvoudig worden aangepast door gebruik te maken van de relaties volgens formule 4.7.

Hieruit volgt dat de formule van Fisk, voor de linker toeritstrook van een turborotonde met twee rotondestroken, als volgt geschreven kan worden:

$$C_{E,1} = \left(Q_{R,I} + Q_{RS,U}\right) \cdot \left(1 - q_{R,I} \cdot t_M\right) \cdot \left(1 - q_{RS,U} \cdot t_M\right) \cdot \frac{e^{-\left(q_{R,I} \cdot t_{C,I} + q_{RS,U} \cdot t_{C,U}\right) + t_M\left(q_{R,I} + q_{RS,U}\right)}}{1 - e^{-t_F\left(q_{R,I} + q_{RS,U}\right)}} \qquad (4.18)$$

Capaciteitsformule van Hagring

De formule van Hagring [7] is een uitbreiding van de formule van Troutbeck, zodat deze geschikt wordt voor toepassing op een meerstrooksrotonde. Troutbeck heeft voor zijn formule gebruik gemaakt van de aanname dat de volgtijden van het verkeer op de rotonde verdeeld zijn volgens de M3 verdeling. Hagring heeft op basis van diezelfde M3 verdeling een volgtijdverdeling gemaakt voor hiaten die simultaan op de binnenste en buitenste rijstrook optreden. In deze formule wordt dan ook onderscheid gemaakt in kritisch hiaat en oprijvolgtijd voor de verschillende rotondestroken. Aangenomen wordt dat de minimum volgtijd voor de twee rotondestroken gelijk is.

De formule van Hagring, voor twee rotondestroken, is als volgt:

$$C_E = 3600 \cdot \Lambda \prod_{i=1}^{2} \frac{\varphi_i \cdot q_{R,i}}{\lambda_i} \cdot \frac{e^{-\sum_k \lambda_k \cdot t_{C,k}}}{e^{-\Lambda \cdot t_M} \cdot \left(1 - e^{\lambda_m \cdot t_{F,m}}\right)} \tag{4.19}$$

$$\lambda_i = \frac{\varphi_{,i} \cdot q_{R,i}}{1 - t_M \cdot q_{R,i}} \tag{4.20}$$

Λ = $\Sigma_i \lambda_i$
C_E = Capaciteit van de toerit [vtg/h]
$q_{R,i}$ = Intensiteit rotondeverkeer voor rotondestrook i in [vtg/s]
$t_{C,k}$ = Kritisch hiaat van automobilisten op de toerit voor invoegen naar rotondestrook k [s]
t_M = Minimale volgtijd rotondeverkeer [s]
$t_{F,m}$ = Oprijvolgtijd toeritverkeer voor invoegen naar rotondestrook m, in peloton invoegen bij wachtrij op toerit [s]
λ = Invloed van de rotonde-intensiteit op de hiaatgrootte [-]
φ = Proportie vrij voertuigen (ongeclusterd) op rotonde [-]

Hieruit volgt dat de formule van Hagring, voor de linker toeritstrook van een turborotonde met twee rotondestroken, als volgt geschreven kan worden:

$$C_{E,1} = 3600 \cdot \left(\lambda_{R,I} + \lambda_{RS,U}\right) \cdot \frac{\varphi_I \cdot q_{R,I} \cdot \varphi_U \cdot q_{RS,U}}{\lambda_{R,I} \cdot \lambda_{RS,U}} \cdot \frac{e^{-\left(\lambda_{R,1} \cdot t_{C,I} + \lambda_{RS,U} \cdot t_{C,U}\right) + t_M\left(\lambda_{R,1} + \lambda_{RS,U}\right)}}{1 - e^{-\left(\lambda_{R,1} \cdot t_F + \lambda_{RS,U} \cdot t_F\right)}} \tag{4.21}$$

4.2.3 Vergelijking verschillende modellen

De capaciteitsmodellen hebben allen verschillende eigenschappen en beperkingen. In deze paragraaf worden de voor- en nadelen van de verschillende modellen besproken en wordt aangegeven welk model geschikt is voor een bepaalde situatie.

Capaciteitsformule van Bovy

De formule van Bovy [1] heeft als voordeel dat de uitkomsten, ondanks de eenvoud van de formule en de brede toepasbaarheid, redelijk betrouwbaar[2] zijn. De formule is eenvoudig toepasbaar omdat slechts de richtingsverdeling en de beoogde vormgeving van de rotonde beschikbaar hoeven te zijn.
Het nadeel van de formule is dat de modelparameters bepaald zijn aan de hand van regressie analyse op basis van onderzoeksresultaten uit Zwitserland. Hierdoor zijn de uitkomsten niet representatief voor de Nederlandse situatie. Wanneer men de modelparameters wil bepalen voor de Nederlandse situatie zijn er capaciteitsmetingen nodig van verschillende rotondetypes. Goede meetresultaten zijn echter schaars, omdat weinig rotondes (en zeker turborotondes) in Nederland voor langere tijd op capaciteitsniveau worden belast.

Capaciteitsformule van Brilon

De formule van Brilon [2] is, net als de formule van Bovy, eenvoudig toepasbaar en de uitkomsten zijn redelijk betrouwbaar (zie paragraaf 4.4). De formule van Brilon is echter minder breed toepasbaar dan die van Bovy. De formule heeft namelijk de eigenschap dat de capaciteit van de gehele toerit wordt berekend in plaats van een enkele toeritstrook. Hierdoor is de formule van Brilon niet toepasbaar voor een turborotonde.
Daarnaast zijn de modelparameters, net als bij de formule van Bovy, afgeleid van buitenlandse meetresultaten. Hierdoor zullen de uitkomsten waarschijnlijk niet representatief zijn voor de Nederlandse situatie.

Capaciteitsformule van Tanner

Het voordeel van de formule van Tanner [4] is dat deze redelijk eenvoudig is en zeer goede resultaten geeft. Een ander voordeel is dat deze formule is gebaseerd op rijeigenschappen van automobilisten die zijn te meten zonder dat de rotonde zodanig is belast dat de maximale capaciteit is bereikt. Een nadeel van de formule is dat deze alleen toegepast kan worden op enkelstrooksrotondes.

Capaciteitformule van Troutbeck

De formule van Troutbeck [5] is, net als die van Tanner, gebaseerd op rijeigenschappen van automobilisten. De resultaten van de formule van Troutbeck zijn echter wel beter dan die van Tanner. Dit komt omdat deze is gebaseerd op een nauwkeurigere volgtijdverdeling waarbij het percentage vrije voertuigen in rekening wordt gebracht. Dit is tevens een nadeel van deze formule, omdat het percentage vrije voertuigen zich lastig laat bepalen. Een ander nadeel is dat de formule van Troutbeck, net als de formule van Tanner, alleen geschikt is voor enkelstrooksrotondes.

Capaciteitsformule van Fisk

De capaciteitsformule van Fisk [6] is een uitbreiding van de formule van Tanner, waardoor deze geschikt is voor meerstrooksrotondes. Deze formule heeft dus dezelfde voordelen als die van Tanner maar niet het nadeel dat de formule alleen toepasbaar is voor enkelstrooksrotondes.

Capaciteitsformule van Hagring.

Voor de capaciteitsformule van Hagring [7] geldt hetzelfde als voor de capaciteitsformule van Fisk, alleen gaat het hier om een uitbreiding van de formule van Troutbeck.

[2] Gebaseerd op de ervaring bij toepassing door verschillende bedrijven en instanties zoals Witteveen+Bos en Provincie Zuid-Holland.

4.3 Parameters

In deze paragraaf worden de verschillende parameters uit de verkeersstroommodellen en de hiaatacceptatiemodellen toegelicht. Er zal een beschrijving worden gegeven van de betekenis van de verschillende parameters en de wijze waarop de parameters moeten worden bepaald.

4.3.1 Definitie en betekenis van de parameters

In de verschillende capaciteitsmodellen, zoals beschreven in paragraaf 4.2, komen een aantal parameters voor die nader verklaard moeten worden om goed inzicht te krijgen in de werking van de diverse modellen.

De verkeersstroommodellen bevatten de volgende parameters:
Voor Bovy: a, b en C_0 en voor Brilon: B, d en C_0.

De parameters die gebruikt worden in de hiaatacceptatiemodellen zijn: t_C, t_M, t_F, φ en λ.

Achtereenvolgens zullen worden behandeld: a, b, C_0, B, d, t_C, t_M, t_F, φ, λ en de pae.

Invloed van het afslaande verkeer (a)

De parameter a, zoals gebruikt in de formule van Bovy, kan worden gedefinieerd als de invloed van het afslaande verkeer op de toeritcapaciteit. Deze invloed heeft te maken met automobilisten die wachten met invoegen totdat ze zeker zijn dat het vermoedelijk afslaande voertuig daadwerkelijk afslaat. De grootte van deze invloed heeft vooral te maken met het geometrisch ontwerp van de rotonde en specifiek met de breedte van de middengeleider. Deze invloed wordt ook wel schijnconflict genoemd.

Invloed aantal rijstroken op de rotonde (b)

De parameter b, zoals gebruikt in de formule van Bovy, kan worden gedefinieerd als de invloed van het aantal rijstroken op de capaciteit. Hiervoor geldt dat een verdubbeling van het aantal rijstroken niet automatisch leidt tot een verdubbeling van de capaciteit.

Maximale capaciteit van een toeritstrook (C0)

De parameter C_0, zoals gebruikt in de formule van Bovy en Brilon, kan worden gedefinieerd als de capaciteit van een rijstrook op de toerit (Bovy) of de gehele toerit (Brilon), wanneer er geen verkeer op de rotonde aanwezig is. Dit is afhankelijk van het geometrisch ontwerp van een rotonde.

Invloed van het rotondeverkeer (B)

De parameter B, zoals gebruikt in de formule van Brilon, kan worden gedefinieerd als de mate van invloed van het rotondeverkeer op de capaciteit van de toerit. De mate van deze invloed is afhankelijk van het aantal rijstroken op zowel de rotonde als de toerit.

Invloed van geometrisch ontwerp van de rotonde op het schijnconflict (d)

De parameter d kan worden gezien als de invloed van het geometrisch ontwerp op het schijnconflict en kan hetzelfde worden gedefinieerd als a/b (uit de formule van Bovy). Deze parameter wordt, indien nodig, toegevoegd aan de capaciteitsformules om de invloed van het schijnconflict in rekening te brengen.

Het kritisch hiaat (tC)

In algemene termen is een hiaat tussen twee opeenvolgende voertuigen gedefinieerd als: de ruimte, uitgedrukt in tijd [s], tussen de achterkant van het eerste voertuig en de voorkant van het volgende voertuig.

Het kritisch hiaat is gedefinieerd als: het minimale hiaat, gemeten in seconden, tussen twee opeenvolgende voertuigen, dat door een invoegende automobilist wordt benut om in te voegen. Per definitie worden alle hiaten groter dan het kritisch hiaat geaccepteerd en alle hiaten kleiner dan dit kritisch hiaat verworpen.
Over de definitie van een hiaat, of gap, bestaat in de literatuur onenigheid.
In de literatuur wordt het begrip "gap" op de volgende twee manieren gedefinieerd:
De ruimte, uitgedrukt in tijd, tussen achterkant eerste voertuig en voorkant volgend voertuig;
De ruimte, uitgedrukt in tijd, tussen achterkant eerste voertuig en achterkant volgend voertuig;

Onderstaand wordt een overzicht gegeven van hoe de verschillende auteurs een "gap" definiëren:

Troutbeck & Brilon [8]
'Gaps are measured in time and are equal to headways'[3]

Hagring [7]
'A gap is defined as the time between the back of a major-stream vehicle and the front of the succeeding vehicle'[4]
Hagring heeft voor het maken van zijn dataset eerst de volgtijden, of headways, bepaald en daarna de geaccepteerde en verworpen "gaps" berekend[5].

Hegeman & Hoogendoorn [9]
`the critical gap is: the minimum time, in seconds, between successive vehicles in which the subject vehicle can perform the intended maneuver.'[6]

Brilon, Koenig en Troutbeck [10]
'A minor street vehicle can only enter the conflict area if the next major vehicle is *far enough* away to allow the minor vehicle safe passage of the whole conflict area. "far enough" is defined as: The next major street vehicle will arrive at the intersection at an instant that will happen t_C seconds after the previous major stream vehicle...this t_C value is called the critical gab.'
Verder gebruiken zij de uitdrukking "time gap" voor zowel het kritisch hiaat en de oprijvolgtijd[7]. Hieruit valt te concluderen dat "headways" gelijk worden gesteld aan "gaps".

Hoogendoorn, Hegeman en Dijker [11][8]
Definition 6: A nett time headway is defined as the period between the passing moments of the rear side of the preceding vehicle and the front of the vehicle considered. Definition 7: A gross time headway (or simply headway) refers to the same reference point of both vehicles, e.g. front or back. Using the rear side of both vehicles has the advantage that the headway of a vehicle is dependent on its own length and not on the length of its predecessor. Definition 8: A time headway of a vehicle is defined by the distance between the rear bumper of the preceding vehicle and the rear bumper of the considered vehicle at a certain time instant.
In traffic flow theory a time headway is usually a gross headway, because then the mean value is known if intensity is known. Other terms used for time headway are gap and interval.

Vooral uit de laatste zin valt te concluderen dat ook Hoogendoorn het begrip "gap" gelijkstelt aan "headway".
Samengevat:

[3] paragraaf 8.1.1
[4] pagina 8 & 9
[5] pagina 44, bovenaan
[6] pagina 4
[7] pagina 71
[8] pagina 22 & 23

Troutbeck, Brilon, Koenig en Hoogendoorn gebruiken: "achterkant – achterkant"
Hagring, Hegeman en Hoogendoorn gebruiken: "achterkant – voorkant"

Wanneer wordt gekeken naar het gebruiksdoel van een hiaat in deze studie, moet gelet worden op de werking van de capaciteitsformules. Het basisconcept voor de formules is dat de capaciteit van een toerit wordt bepaald door het aanbod, zowel de frequentie als de grootte, van hiaten in de hoofdstroom en de benutting van deze aangeboden hiaten door de invoegende stroom. Het aanbod van de hiaten wordt beschreven door een volgtijdverdeling. Merk hierbij op dat een volgtijdverdeling een verdeling van de volgtijden beschrijft en niet een verdeling van de hiaten.

In de hiaatacceptatietheorie wordt de aanname gedaan dat voertuigen worden behandeld als representatieve punten, zonder afmeting. Door deze aanname te doen worden volgtijden gelijk gesteld aan hiaten. Hierdoor is het mogelijk om een volgtijdverdeling te gebruiken in plaats van een hiaatverdeling. Deze volgtijdverdeling is dan alleen geldig voor een bepaalde snelheid en een bepaalde verdeling van de voertuiglengtes in de verkeersstroom.

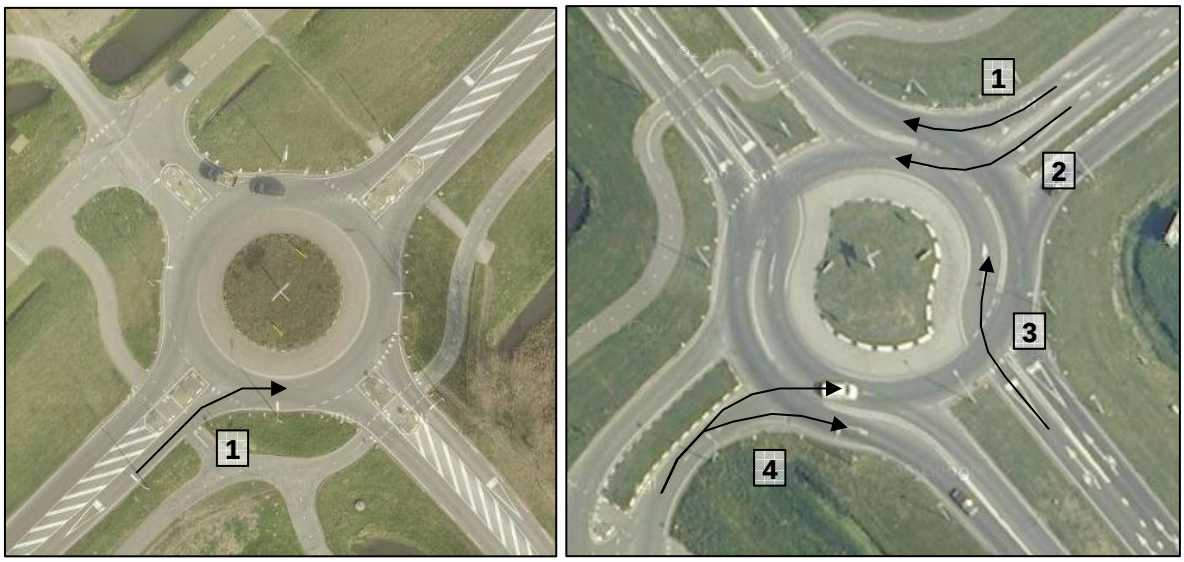
Het kritisch hiaat is ondermeer afhankelijk van:

- Rijgedrag van de automobilist
- Mate van haast bij de automobilist
- Karakteristieken van het voertuig, zoals grootte en vermogen
- Verkeerssituatie.

Naast het rijgedrag van de verschillende automobilisten is ook de verkeerssituatie van invloed op het kritisch hiaat. In het kader van dit rapport wordt gekeken naar de relatie tussen het type rotonde en het kritisch hiaat.

In dit onderzoek worden twee rotondetypen beschouwd, te weten: de gewone enkelstrooks rotonde en de turborotonde. Op deze twee typen rotondes zijn vier verschillende invoegsituaties te onderscheiden:
1. Invoegen op de buitenste rotondestrook;
2. Combinatie van invoegen op de binnenste en kruisen van de buitenste rotondestrook;
3. Alleen kruisen van de buitenste rotondestrook;
4. Keuzemogelijkheid tussen invoegen op de buitenste of binnenste rotondestrook.

Deze vier situaties worden verduidelijkt aan de hand van een voorbeeld, zie Figuur 4-1.



Figuur 4-1: Verschillende invoegbewegingen op rotondes

Op een enkelstrooksrotonde is maar één invoegsituatie te onderscheiden en dat is duidelijk situatie 1. Hierbij wordt een hiaat gekozen in de verkeersstroom op de buitenste, en enige, rotondestrook.

Voor een turborotonde wordt aangenomen dat, in het geval van een tweestrooks toerit, het invoegen naar de buitenste rotondestrook gelijk is aan de invoegsituatie van een enkelstrooks rotonde. Dit zal echter moeten worden onderzocht.
Bij het invoegen naar de binnenste rotondestrook (situatie 2) moet gelijktijdig, in zowel de buitenste als de binnenste rotondestroom, een bruikbaar hiaat optreden.
In situatie 3 wordt de verkeersstroom op de buitenste rotondestrook gekruist en hoeft er verder niet ingevoegd te worden. Er wordt dus alleen een hiaat gekozen in de buitenste rotondestroom, dit verschilt fundamenteel van situatie 2.
In het geval van een enkelstrooks toerit geldt situatie 4. Dit is een combinatie van situatie 1 en 2.

Wanneer deze situaties worden onderscheiden leidt dit tot drie verschillende kritische hiaten. Een kritisch hiaat in de verkeersstroom op:
1. Een enkelstrooks rotonde;
2. De buitenste rotondestrook van een turborotonde;
3. De binnenste rotondestrook van een turborotonde.

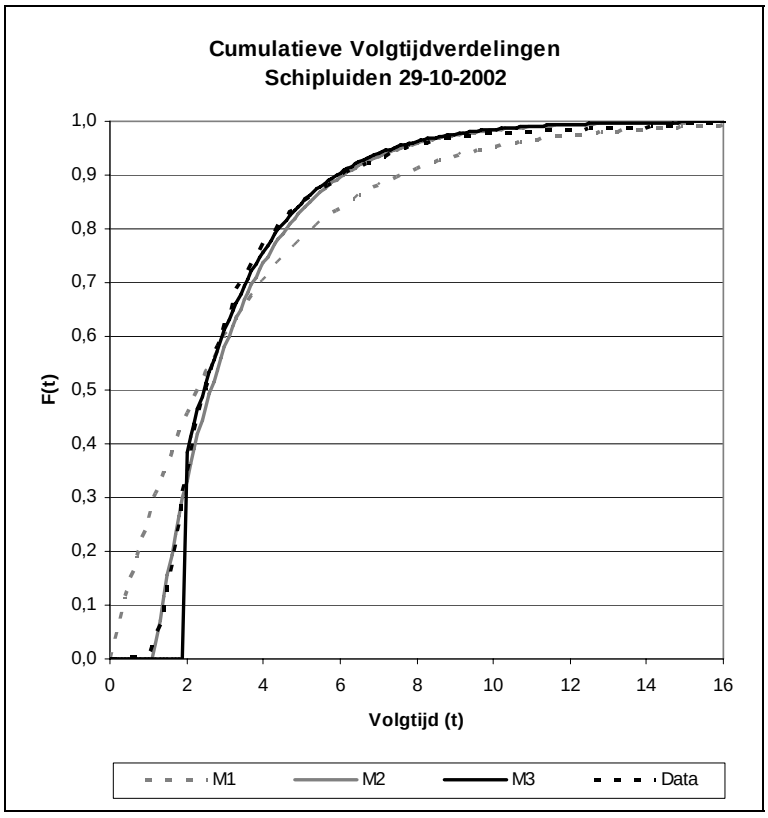
Binnen deze drie verschillende kritische hiaten zal het kritisch hiaat voor een invoegende beweging anders zijn dan voor een kruisende beweging.

(Minimum) volgtijd op de rotonde (t_M)

De minimale volgtijd is van belang wanneer er gekeken wordt naar de verdeling van volgtijden van voertuigen. Een volgtijd kan worden gezien als een gebeurtenis die optreedt met een kans, welke kan worden beschreven door een bepaalde kansverdeling. Welke kansverdeling dit is, is relevant.
In het algemeen worden er bij hiaatacceptatieberekeningen een aantal verschillende volgtijdverdelingen gebruikt. In dit rapport worden alleen de relevante verdelingen behandeld die als basis dienen voor de in deze studie behandelde capaciteitsformules, dit zijn:

- M1 verdeling, ofwel de exponentiële verdeling;
- M2 verdeling, ofwel de verschoven exponentiële verdeling;
- M3 verdeling, zoals beschreven door Cowan [12].

Voorbeelden van de verschillende verdelingen worden getoond in Figuur 4-2.



Figuur 4-2: Cumulatieve volgtijdverdelingen

De M1 verdeling wordt ook wel de "exponentiële verdeling" of "Exp(q)" verdeling genoemd. Deze verdeling is gebaseerd op de aanname dat de aankomsten van voertuigen, gemodelleerd als voertuigen zonder een fysieke lengte, willekeurig en onafhankelijk van elkaar zijn. Dit gedrag wordt beschreven door een Poisson-proces. Wanneer de aankomsten beschreven worden door een Poisson-proces, dan zijn de opvolgtijden exponentieel verdeeld. De cumulatieve kansdichtheidsfunctie is dan:

$$F(t) = 1 - e^{-q_R \cdot t}, t \geq 0$$
$$F(t) = 0, t < 0 \qquad (4.22)$$

De M2 verdeling is feitelijk de verschoven exponentiële verdeling. Deze verschuiving beschrijft de aanname dat voertuigen, in tegenstelling tot de M1 verdeling, beschikken over een bepaalde fysieke lengte. Hierdoor kan de afstand tussen voertuigen niet nul zijn en zullen de voertuigen niet dichter op elkaar rijden dan een bepaalde minimale volgtijd. Een beschrijving van de volgtijden tussen nul seconden en deze minimale volgtijd is overbodig.
De verschuiving van deze verdeling gaat als volgt:
De minimale volgtijd (t_M) in [s] kan worden gezien als de ruimte, uitgedrukt in tijd, rond een voertuig waarbinnen zich geen andere voertuigen kunnen bevinden. De tijd die minimaal nodig is om tijdens een bepaald tijdsinterval q voertuigen te laten passeren is dan: t_M*q [s]. De overgebleven tijd moet in de vorm van volgtijden willekeurig (random) worden verdeeld over de voertuigen. Deze willekeurige component is: $(1-t_M*q)/q$. (overgenomen uit [8] pag. 8-8)
Hieruit volgt de volgende cumulatieve verdelingsfunctie:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda(t-t_M)}, t \geq t_M$$
$$F(t) = 0, t < t_M \quad (4.23)$$

$$\lambda = \frac{q}{1 - q \cdot t_M} \quad (4.24)$$

De M3 verdeling beschrijft de verkeersstroom gedetailleerder dan de M2 verdeling. De M3 verdeling is gebaseerd op de aanname dat de verkeersstroom bestaat uit twee soorten voertuigen:
1. Voertuigen rijdend in een peloton (geclusterde voertuigen), allen rijdend met eenzelfde minimale volgtijd.
2. vrij rijdende voertuigen, rijdend met een volgtijd bestaande uit een minimale volgtijd (t_M) + exponentieel verdeelde vrije volgtijd.

In het kader van hiaatacceptatie mag dit worden gedaan, omdat wordt aangenomen dat hiaten tussen geclusterde voertuigen niet geaccepteerd worden door invoegende automobilisten, mits het kritisch hiaat groter is dan t_M.

Voor deze verdeling moet dus een grens worden gesteld die onderscheid maakt tussen vrije en geclusterde voertuigen. Deze grens wordt aangeduid met (t_M). Merk op dat dit per definitie een andere waarde is dan de t_M in de M2 verdeling.

Naast de waarde voor t_M is ook de proportie vrije voertuigen van belang. Hiervoor geldt: "De kans dat een voertuig geclusterd rijdt, dat wil zeggen, dat deze een volgtijd gelijk aan t op zijn voorligger heeft gelijk is aan θ". De kans dat een voertuig vrij rijdt is dan $(1-\theta)=\varphi$. De volgtijden van de vrij rijdende voertuigen worden beschreven door de exponentiële verdeling.
Hieruit volgt de volgende cumulatieve verdelingsfunctie:

$$F(t) = 1 - \varphi \cdot e^{-\lambda(t-t_M)}, t \geq t_M$$
$$F(t) = 0, t < t_M \quad (4.25)$$

$$\lambda = \frac{q \cdot \varphi}{1 - q \cdot t_M} \quad (4.26)$$

In deze studie wordt niet onderzocht welke verdeling het best past op de data. Wel wordt onderzocht wat de waarden van de verschillende parameters zijn die horen bij de volgtijdverdelingen waarop de bovengenoemde capaciteitsformules zijn gebaseerd.
Zowel Troutbeck als Tanner hebben hun formule, direct of indirect, gebaseerd op een volgtijdverdeling volgens dezelfde theorie als de M3 verdeling van Cowan. Het grote verschil zit in de definitie van wanneer een voertuig vrij rijdt en wanneer niet (zie percentage vrije voertuigen).

Oprijvolgtijd toeritverkeer (t_F)

De oprijvolgtijd voor toeritverkeer, of kortweg oprijvolgtijd (t_F) kan worden gedefinieerd als: het verschil van de tijdstippen waarop opeenvolgende voertuigen, optrekkend vanuit stilstand, de stopstreep van de toerit passeren en gezamenlijk gebruik maken van een hiaat in de rotondestroom. De t_F wordt gemeten van achterkant tot achterkant van de voertuigen.

Percentage vrije voertuigen (φ)

De verkeersstoom op de rotonde kan, zoals eerder aangegeven, worden verdeeld in twee categorieën:
1. Vrije voertuigen
2. Geclusterde voertuigen (rijdend in peloton)

In een hiaatacceptatiemodel is alleen het vrije deel van de voertuigen interessant, omdat aangenomen wordt dat de bruikbare hiaten uitsluitend worden aangeboden in het vrije deel van de hoofdstroom[9].
Wanneer een voertuig vrij of geclusterd rijdt is niet eenduidig vastgelegd. In de bovengenoemde capaciteitsformules worden twee verschillende benaderingen gebruikt, te weten: de methode van Tanner en Cowan's M3 verdeling.
Tanner [4] stelt dat er een lineaire relatie bestaat tussen percentage vrije voertuigen, minimale volgtijd en de rotonde intensiteit. Hiervoor geldt de volgende formule:

$$\varphi = 1 - t_M \cdot q_R \tag{4.27}$$

Met deze relatie is het percentage vrije voertuigen direct af te leiden van de gegeven rotonde-intensiteit en de aangenomen minimale volgtijd.

Sullivan en Troutbeck [13] gebruiken ook een lineaire relatie maar deze is niet afhankelijk van t_M. Zij stellen dat φ zodanig moet worden gekozen dat de afwijking van de M3 verdeling, ten opzichte van de gemeten data, minimaal is. De door Sullivan en Troutbeck gevonden relatie zou beter passen op de gemeten data dan de relatie van Tanner.

Decay constant (λ)

De parameter λ, zoals gebruikt in de M3 verdeling van Cowan [12], is een relatie die af hangt van de parameters φ, t_M en q_R, zie formule (4.26).

[9] Deze aanname gaat op wanneer de minimale volgtijd, die een automobilist aanhoudt bij het volgen, oploopt tot een bepaalde waarde die altijd kleiner is dan het kritisch hiaat.

PersonenAutoEquivalent (pae)

P.a.e. staat voor personenautoequivalent. Via de pae-waarde wordt een verhouding bepaald tussen de personenauto en de vrachtauto. Op een rotonde kan de pae-waarde voor een vrachtauto worden beschouwd als de fictieve lengte van een vrachtauto in vergelijking tot die van een personenauto, inclusief de grotere volgafstand die nodig is om in te kunnen voegen.
De pae-waarde voor een vrachtauto op de toerit kan worden beschouwd als de fictieve vergroting van het kritisch hiaat. Een vrachtwagen op de toerit heeft een groter hiaat nodig om de rotonde op te rijden. Als de intensiteit van de rotonde toeneemt, komen grotere hiaten minder voor, zodat mogelijk de pae-waarde van een vrachtauto op de toerit toeneemt, wanneer de intensiteit op de rotonde groter wordt. Anderzijds is waar te nemen dat vrachtauto's op de toerit de voorrang min of meer afdwingen, wat de pae-waarde verlaagt.

Om de invloed van verschillende typen voertuigen in rekening te brengen wordt in deze studie onderscheid gemaakt in vier verschillende voertuigcategorieën, te weten: personenauto's (1), ongelede vrachtauto's (2), gelede vrachtauto's (3) en overig (4), bijvoorbeeld landbouwvoertuigen.

4.3.2 Bepaling parameters

In dit deel van het rapport wordt beschreven hoe de verschillende parameters bepaald kunnen worden.
Van alle eerdergenoemde parameters dienen de meeste opnieuw bepaald te worden om de capaciteitsformules toepasbaar te maken voor de Nederlandse situatie. De volgende parameters moeten worden bepaald: a, b, C_0, B, d, t_C, t_M, t_F, φ en de pae. Deze zullen achtereenvolgens worden behandeld.

Parameters voor de verkeersstroommodellen a, b, C_0, B en d

De verkeersstroommodel-parameters zijn in feite modelparameters. De waarden van deze parameters zijn bepaald door middel van kalibratie, zodanig dat de uitkomsten overeenkomen met die van de praktijkmetingen. Om deze modellen toepasbaar te maken voor de Nederlandse situatie zullen de parameters opnieuw moeten worden bepaald. De data die hiervoor benodigd is zijn gemeten intensiteiten van verkeer op de toerit, afrit en rotonde, gedurende intervallen van vijf minuten. Gedurende deze intervallen moeten er wachtende voertuigen op de toerit staan en dient het rotondeverkeer ongehinderd door te rijden. Aangenomen wordt dat de rotonde onder dergelijke omstandigheden de, maximale, capaciteit heeft bereikt. Hierdoor kunnen de gemeten intensiteiten op de toerit worden gezien als de capaciteit van de toerit.
Aan de hand van deze toeritcapaciteiten kunnen, met behulp van de kleinstekwadratenmethode, de verschillende modelparameters worden geschat. Hoe deze methode precies werkt wordt beschreven in Bijlage B.

Zoals vermeld in paragraaf 4.2 is de invloed van het afslaande verkeer aan de bestaande capaciteitsformules toegevoegd. Om dit te mogen doen is het belangrijk dat deze uitbreiding geen invloed heeft op de overige parameters. De extra variabele, intensiteit afslaand verkeer, moet onafhankelijk zijn van de rotonde-intensiteit en de toeritcapaciteit. De onafhankelijkheid van de volgende variabelen moet worden onderzocht:

- Toerit verkeer - afslaand verkeer
- Circulerend verkeer - afslaand verkeer

De capaciteitsformules zijn gebaseerd op het principe dat de capaciteit van de toerit afneemt naar mate de intensiteit op de rotonde toeneemt. Wanneer men aan de hand van de data de parameters wil schatten, moet dit verschijnsel ook in de data terug te vinden zijn. De capaciteit van de toerit dient dus afhankelijk te zijn van de rotonde-intensiteit. De afhankelijkheid van de volgende variabelen moet worden onderzocht:

- Toerit verkeer - circulerend verkeer

De gewenste afhankelijkheid of onafhankelijkheid wordt onderzocht met behulp van regressieanalyse. De relatie 'circulerend verkeer - afslaand verkeer' wordt onderzocht met een enkelvoudige regressie en de relatie 'toerit verkeer - afslaand verkeer – circulerend verkeer' wordt onderzocht met een meervoudige regressie. Hoe deze regressies precies zijn uitgevoerd wordt beschreven in Bijlage B.

Gezamenlijk schatten van parameters voor hiaatacceptatiemodellen t_C, t_M, t_F en φ

In tegenstelling tot de parameters van de verkeersstroommodellen, hebben de parameters van een hiaatacceptatiemodel een grotere betekenis dan slechts ter kalibratie. Deze parameters beschrijven het gedrag van automobilisten en kunnen afzonderlijk van elkaar bepaald worden aan de hand van gemeten data. Echter, de parameters kunnen ook op dezelfde manier geschat worden als de parameters van de verkeersstroommodellen. In theorie zouden de uitkomsten van deze gezamenlijke schatting overeen moeten komen met de uitkomsten van de afzonderlijke schattingen.

Afzonderlijk schatten van het kritisch hiaat (t_C)

Het kritisch hiaat kan op vele verschillende manieren worden bepaald. Voor dit onderzoek zijn de methode van Raff [14], de Kolmogorov-Smirnov Genetic Algorithm (KS-GA) van Hegeman & Hoogendoorn [9] en de Maximum Likelihood methode bekeken. Hierbij moet opgemerkt worden dat de KS-GA en de ML methode resulteren in een kritisch hiaat verdeling, en dat de methode van Raff resulteert in een enkele waarde.

De methode die in de literatuur het meest wordt aanbevolen is de Maximum Likelihood (ML) methode. Een nieuwe maar ook ingewikkelde methode is de KS-GA methode van Hegeman en Hoogendoorn. De methode van Raff wordt gezien als een relatief simpele maar ook onbetrouwbare benadering. Uit onderzoek, gedaan door Hegman en Hoogendoorn [9], is gebleken dat de KS-GA methode breed toepasbaar is en betrouwbare resultaten geeft. Hetzelfde onderzoek toont echter ook aan dat de resultaten minder betrouwbaar zijn dan de ML resultaten. Aan de hand hiervan is besloten dat de ML methode zal worden gebruikt voor deze studie. Bij toepassing van de ML methode wordt uitgegaan van een lognormale verdeling van het kritisch hiaat. De ML kan ook worden uitgevoerd met een normale verdeling. Er is echter gebleken dat de aanname van lognormaal verdeeld, wat betreft log-likelihood ratio, beter scoort dan normaal verdeeld.

In het paragraaf 4.3.1 is aangegeven dat voertuigen worden behandeld als representatieve punten. Hierdoor wordt het hiaat gelijkgesteld aan de volgtijd en moet dus ook worden gemeten als een volgtijd, te weten van achterkant eerste voertuig tot achterkant volgende voertuig.

De benodigde data voor het bepalen van het kritisch hiaat zijn het geaccepteerde hiaat en grootste verworpen hiaat, voorafgaand aan het geaccepteerde hiaat. Het kritische hiaat zal hier tussen liggen.
Zoals beschreven in paragraaf 4.3.1 kunnen er voor deze studie drie verschillende typen kritisch hiaat worden onderscheiden, te weten:

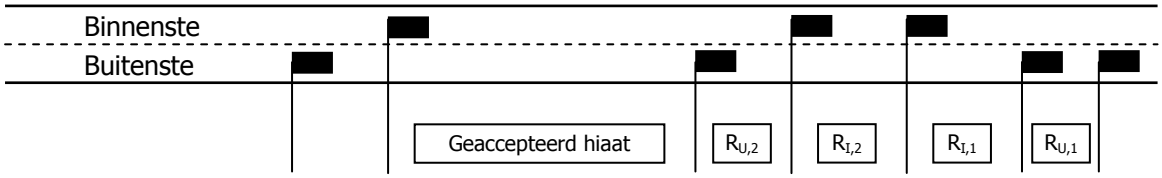
1. Kritisch hiaat in de verkeersstroom op een enkelstrooksrotonde;
2. Kritisch hiaat in de verkeersstroom op de buitenste rotondestrook van een turborotonde;
3. Kritisch hiaat in de verkeersstroom op de binnenste rotondestrook van een turborotonde.

De combinatie geaccepteerd hiaat / verworpen hiaat voor het kritisch hiaat van type 1 is eenvoudig vast te stellen, omdat hier maar één rotondestrook aanwezig is en dus maar één combinatie mogelijk is.
Voor een turborotonde is dit anders. In de situatie: linker strook op een tweestrooks toerit van een turborotonde, zal het verkeer te allen tijde (mits het zich aan de verkeersregels houdt) de verkeersstroom op de buitenste rotondestrook kruisen en invoegen op de binnenste rotondestrook. Om deze beweging uit te kunnen voeren zal er gelijktijdig een voldoende groot hiaat op de buitenste en op de binnenste rotondestrook moeten optreden.
Omdat dit twee verschillende verkeerssituaties zijn, zal de automobilist twee verschillende kritische hiaten aanhouden, te weten: een kritisch hiaat voor de buitenste rotondestrook en een kritisch hiaat voor de binnenste rotondestrook. Deze twee kritische hiaten zullen van elkaar verschillen omdat de buitenste verkeersstroom moet worden gekruist en bij de binnenste verkeersstroom moet worden ingevoegd. Daarnaast zal de snelheid van het voertuig vóór het kruisen van de verkeersstroom op de buitenste rotondestrook nul zijn (het voertuig staat immers te wachten) en zal het enige snelheid hebben bij het invoegen in de verkeersstroom op de binnenste rotondestrook.
Voordat een voertuig kan invoegen in de verkeersstroom op de binnenste rotondestrook zal de bestuurder meestal eerst een aantal hiaten verwerpen. Dit zijn combinaties van hiaten op de buitenste en op de binnenste rijstrook. De verwachting is dat deze kritische hiaten van elkaar verschillen. Om dit aan te kunnen tonen zal een onderscheid worden gemaakt tussen hiaten op de buitenste rijstrook en hiaten op de binnenste rijstrook.
Wanneer een voertuig invoegt is, óf het hiaat op de buitenste rijstrook, óf het hiaat op de binnenste rijstrook maatgevend. Nu is de vraag: 'Welk verworpen hiaat hoort bij het geaccepteerde hiaat?'

In het proefschrift van Hagring [7] worden drie methoden beschreven hoe om te gaan met verworpen en geaccepteerde hiaten. Voor deze studie is gebruik gemaakt van het superposed model. Deze methode wordt uitgelegd aan de hand van het onderstaande voorbeeld.

Voordat een hiaat wordt geaccepteerd worden er vier hiaten verworpen, te weten:
1. $R_{U,1}$
2. $R_{I,1}$
3. $R_{I,2}$
4. $R_{U,2}$

Deze vier voorbeelden zijn weergegeven in Figuur 4-3.



Figuur 4-3: Verschillende vormen van hiaten

Hiaat $R_{u,1}$ is duidelijk een hiaat op de buitenste (Utter lane) rotondestrook en $R_{I,2}$ is duidelijk een hiaat op de binnenste (Inner lane) rotondestrook. In de overige gevallen is het voertuig dat het hiaat sluit maatgevend voor de categorie waarin het hiaat valt. Rijdt het voertuig dat het hiaat sluit op de binnenste rijstrook dan valt het hiaat onder categorie "hiaat binnen". Rijdt het voertuig dat het hiaat sluit op de buitenste rijstrook dan valt het hiaat onder categorie "hiaat buiten". Het geaccepteerde hiaat valt in het voorbeeld dus onder categorie "hiaat binnen". Om een goede bepaling te krijgen voor het kritisch hiaat op de binnenste rotondestrook zal het maatgevende (maximale) verworpen hiaat ook van de categorie "hiaat binnen" moeten zijn.

De benodigde data voor het bepalen van het kritisch hiaat zijn volgtijden van het rotondeverkeer en oprijtijden van het toeritverkeer, uitgesplitst in verschillende voertuigcategorieën. Het hiaat wordt gemeten van achterkant tot achterkant van de opeenvolgende voertuigen.

Het kritisch hiaat zal eerst worden bepaald voor alleen personenvoertuigen. Vanwege het gebruik van volgtijden zal een personenauto gevolgd door een vrachtwagen een grotere volgtijd hebben dan een vrachtwagen gevolgd door een personenauto. Dit resulteert in een overschatting van het aantal bruikbare hiaten. Om dit tegen te gaan worden waarnemingen van de vorm "personenauto gevolgd door vrachtwagen" niet opgenomen in de dataset. Waarnemingen van de vorm "vrachtwagen gevolgd door personenauto" worden wel meegenomen. Deze resultaten zijn nodig voor toepassing in de analytische modellen omdat hierin gerekend wordt met pea-waarden.

Het kritisch hiaat zal ook worden bepaald voor de gehele verkeersstroom door geen onderscheid te maken tussen de verschillende voertuigcategorieën. Dit resultaat zal worden gebruikt bij de kalibratie van het simulatiemodel en staat beschreven in hoofdstuk 5.

Afzonderlijk schatten van de minimale volgtijd (t_M) en het percentage vrije voertuigen (φ)

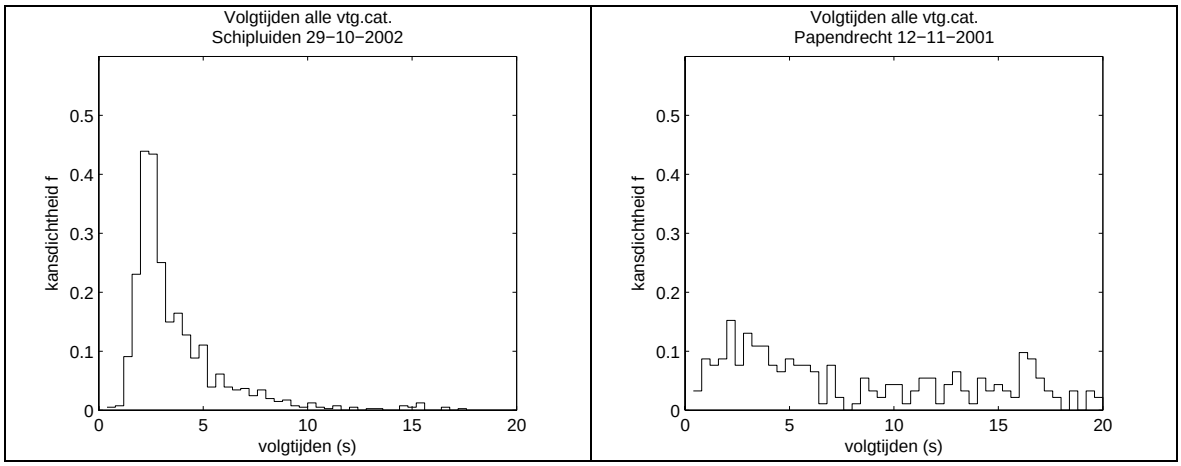
De parameters t_M en φ beschrijven de M3 verdeling. Er zijn verschillende methoden beschikbaar waarmee deze parameters kunnen worden geschat:

- Momentenmethode
- Maximum Likelihood methode
- Lineaire regressie methode

Hagring [7] geeft in zijn proefschrift aan dat alle drie de methoden gelijkwaardige uitkomsten bieden en het om het even is welke methode gebruikt wordt. Voor deze studie is, vanwege de eenvoudige toepassing, de Maximum Likelihood (ML) methode toegepast, zoals omschreven door Sullivan en Troutbeck [13].

Sullivan en Troutbeck [13] geven als advies de t_M als constante op een bepaalde waarde vast te zetten en aan de hand hiervan φ te bepalen. Sullivan en Troutbeck gebruiken in hun publicatie voor t_M een waarde van 2,0 [s]. Hagring [7] geeft in zijn proefschrift aan dat de minimale volgtijd, ten opzichte van de andere parameters, het minst afhankelijk is van de intensiteit en gaat er van uit dat t_M ligt tussen de 1,5 en de 2,5 seconden. Hij rekent met de waarden 1,5, 1,8 en 2,0.

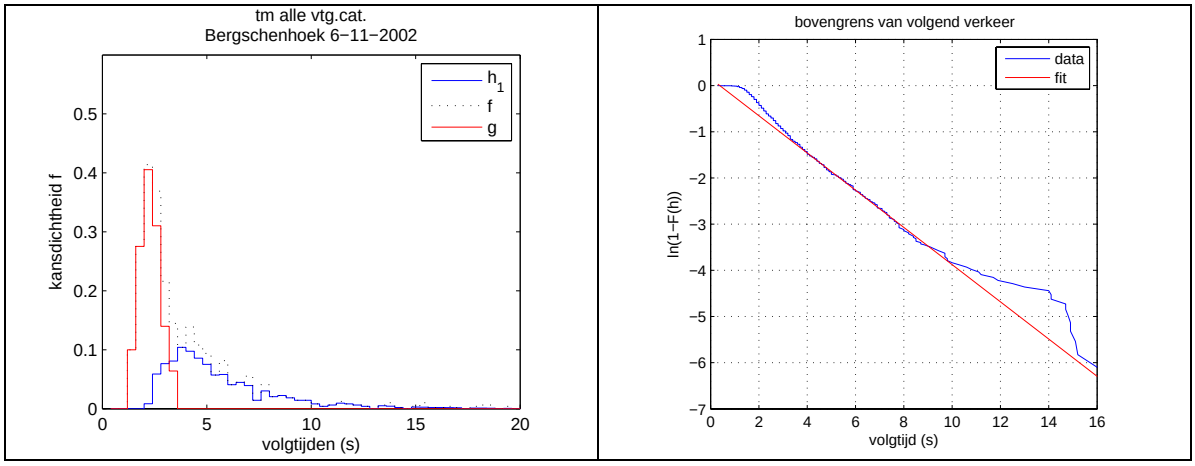
Welke waarde daadwerkelijk gebruikt moet worden voor t_M berust slechts op aannamen.
Om deze aanname gefundeerd te kunnen doen kan worden gekeken naar de data.
In Figuur 4-4 zijn twee grafieken met meetresultaten van volgtijden op twee verschillende rotondes weergegeven.



Figuur 4-4: Volgtijdverdelingen op enkelstrooks rotondes

In de linker grafiek is te zien dat tussen 1 en 2 seconden een groot aantal waarnemingen zit en dat vanaf ongeveer 2 seconden het aantal waarnemingen exponentieel afneemt. Hoogendoorn [15] heeft een benadering ontwikkeld waarbij de volgtijdverdeling wordt gesplitst in een verdelingsfunctie voor het geclusterde verkeer en een verdelingsfunctie voor het vrij rijdende verkeer. Aangenomen wordt dat het gemiddelde van de verdelingsfunctie van het geclusterde verkeer een goede schatter is voor de waarde van t_M. Een dergelijke splitsing is alleen mogelijk wanneer er sprake is van veel rotondeverkeer, waardoor de volgtijden verdeeld zijn zoals bij de linker grafiek. Is er sprake van weinig rotondeverkeer, dan volgt een verdeling zoals getoond in de rechter grafiek. Voor deze verdeling is het niet mogelijk de splitsing uit te voeren.

Figuur 4-5 toont een voorbeeld van de splitsing van de gemeten volgtijdverdeling (f) in een verdeling voor het vrij rijdende verkeer (h_1) en het geclusterde verkeer (g). Hiervoor is de maximale voltijd voor een geclusterd voertuig bepaald met behulp van de methode zoals getoond door de rechter afbeelding in Figuur 4-5.



Figuur 4-5: links: Splitsing volgtijdverdeling, rechts: bepaling van bovengrens van volgend verkeer

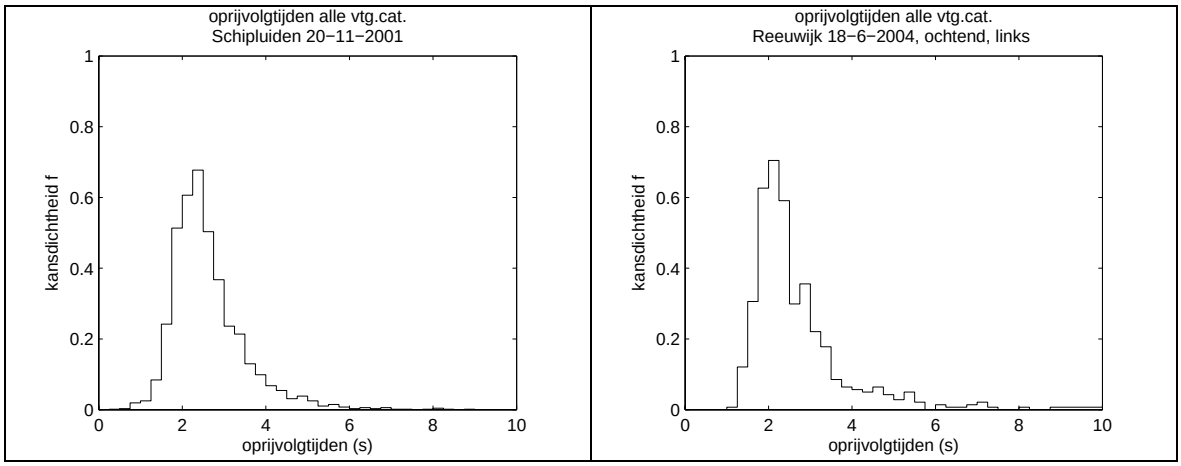
Wanneer de waarde van t_M vastgesteld is kan met behulp van ML de waarde van φ worden bepaald.

Wanneer er genoeg data beschikbaar is, kan de dataset opgedeeld worden en kan voor ieder deel een φ worden berekend met de ML methode. Voor deze studie is uitgegaan van sub-datasets met ongeveer 250 waarnemingen.
Wanneer deze waarden voor φ worden uitgezet tegen de rotonde-intensiteit (q_R), kan een relatie worden gevonden tussen φ en q_R.
Op deze manier zijn door Troutbeck & Brilon [8] en Hagring [7] verschillende relaties gevonden. Waarschijnlijk verschilt deze relatie per verkeerssituatie en wordt de relatie beïnvloedt door de richtingsverdeling op de rotonde. Daarnaast is de M3 verdeling gebaseerd op aankomsttijden van het rotondeverkeer, verdeeld volgens een Poisson-proces. Wanneer er zich bovenstrooms, niet ver van de rotonde, een met verkeerslichten geregeld kruispunt bevindt, zijn de aankomsttijden niet meer onafhankelijk en zal de uitkomst van φ niet betrouwbaar meer zijn en zal er een andere relatie bestaan tussen φ en q_R.

De benodigde data voor het bepalen van t_M zijn opvolgtijden van het rotondeverkeer, uitgesplitst in verschillende voertuigcategorieën. De volgtijd wordt gemeten van achterkant tot achterkant van de opeenvolgende voertuigen.
Net als het kritisch hiaat wordt de minimale volgtijd twee maal berekend, te weten: voor alleen personenauto's en voor alle voertuigcategorieën. Het resultaat van alleen personenauto's wordt gebruikt voor het analytisch model, en het resultaat van alle voertuigcategorieën wordt gebruikt voor het simulatiemodel.

Afzonderlijk schatten oprijvolgtijd van de toerit (t_F)

Om een beeld te krijgen van de optredende opvolgtijden kan gekeken worden naar de meetresultaten. In Figuur 4-6 zijn histogrammen weergegeven van oprijvolgtijden op de rotondes van Schipluiden en Reeuwijk.



Figuur 4-6: Histogrammen van oprijvolgtijden op rotondes

Te zien is dat de data redelijk normaal verdeeld is, echter met een zwaardere staart naar rechts. De waarde voor de oprijvolgtijd is het gemiddelde van de dataset, zonder rekening te houden met de extreme uitschieters naar boven. Om de invloed van deze uitschieters te minimaliseren wordt de mediaan van de dataset genomen als waarde voor de minimale oprijvolgtijd. Dit is eveneens gedaan voor alleen personenauto's en voor alle voertuigcategorieën.

PersonenAutoEquivalent (pae)

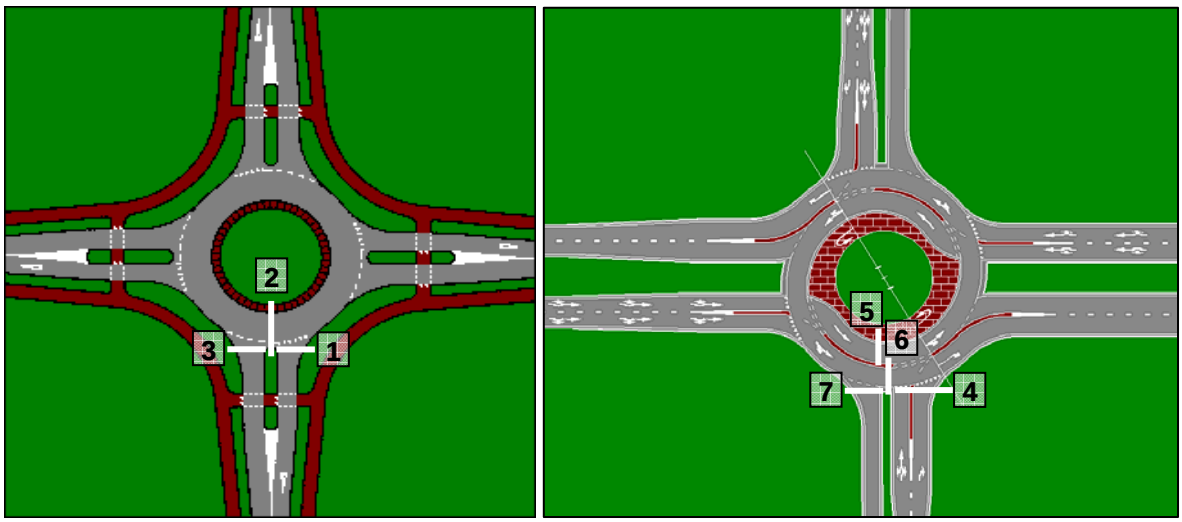
Wanneer men aparte pae-waarden wil toewijzen aan de eerste drie voertuigcategorieën (personenauto's, ongelede vrachtauto's en gelede vrachtauto's) voor het kritisch hiaat, de minimum volgtijd en de oprijvolgtijd van de toerit, krijgt men 15 parameters die toegevoegd kunnen worden aan de capaciteitsformules.
Wanneer deze parameters worden geschat door middel van een lineaire regressie wordt het aantal vrijheidsgraden dusdanig groot dat het twijfelachtig is of de formule wel de juiste uitkomsten genereert.
Aangenomen wordt dat de het in rekening brengen van pae-waarden leidt tot meer realistische uitkomsten. Echter, een overschot aan modelparameters maakt het model instabiel. Daarom is in deze studie gekozen voor het aanbrengen van twee extra modelparameters voor de pae. Dit zijn een pae-waarde voor het ongelede vrachtverkeer en het gelede vrachtverkeer. Deze pae's worden aangenomen als gelijk voor de rotonde en de toerit.
De betrouwbaarheid van de pae-waarden is afhankelijk van de hoeveelheid beschikbare gegevens en de correlatie tussen de variabelen. Het is van belang dat de variabelen onafhankelijk van elkaar zijn. Wanneer de variabelen afhankelijk van elkaar zijn, kan de invloed niet goed bepaald worden. Eén van deze variabelen is in dat geval overbodig en zal niet in een schatting meegenomen kunnen worden.
De onafhankelijkheid die aangetoond dient te worden is: intensiteit gelede vrachtwagens ten opzichte van intensiteit ongelede vrachtwagens. Deze onafhankelijkheid wordt onderzocht door middel van een enkelvoudige regressie.

4.4 Beschikbare data

In deze studie is gebruik gemaakt van meetgegevens van de volgende rotondes:

- Schipluiden, enkelstrooksrotonde gelegen op de N468 ter hoogte van de A4, afrit 13 (Den Hoorn).
- Papendrecht, enkelstrooksrotonde gelegen op de kruising van de N214 met de parallelweg van de A15.
- Bergschenhoek, enkelstrooksrotonde gelegen op de kruising van de N472 met de Bergweg-Noord.
- Rotterdam, turborotonde gelegen op de kruising van de N471 met de Landscheiding.
- Reeuwijk, turborotonde gelegen op de N459 ter hoogte van de A12, afrit 12 (Reeuwijk).

De meetgegevens zijn verkregen uit video-opnamen van een rotondetoerit gedurende een spitsperiode. De resulterende data bestaan uit tijdstippen waarop de voertuigen met hun achterzijde een denkbeeldige lijn passeren. Geregistreerd zijn: het rotondeverkeer, het toeritverkeer en het afslaand verkeer. Figuur 4-7 toont de locatie van de denkbeeldige lijnen op de enkelstrooksrotonde en de turborotonde.



Figuur 4-7: Locatie passagelijnen op de enkelstrooks- en turborotonde

De getoonde cijfers worden als volgt verklaard:

1. Toeritverkeer enkelstrooksrotonde.
2. Rotondeverkeer enkelstrooksrotonde.
3. Afslaand verkeer enkelstrooksrotonde.
4. Toeritverkeer turborotonde.
5. Rotondeverkeer binnenste rotondestrook.
6. Rotondeverkeer buitenste rotondestrook.
7. Afslaand verkeer turborotonde.

Aan de hand van deze passagetijden kunnen de oprijvolgtijden van het toeritverkeer, de volgtijden van het rotondeverkeer en de volgtijden van het afslaande verkeer worden bepaald. Deze waarden zijn nodig voor het vaststellen van de parameters van de hiaatacceptatiemodellen.

Wanneer er gedurende een periode sprake was van filevorming op de toerit, geldt deze periode als capaciteitswaarneming. De duur van deze periode is gesteld op vijf[10] minuten. Een capaciteitswaarneming bestaat uit de capaciteit van de toerit, de intensiteit van het rotondeverkeer en de intensiteit van het afslaande verkeer. Deze vijf minuten waarden worden omgerekend naar uur capaciteiten en intensiteiten. Aan de hand van deze capaciteitswaarnemingen kunnen de parameters voor de verkeersstroommodellen worden geschat.

[10] Er is gekozen voor vijf minuten omdat de resultaten voor kortere periodes een grotere spreiding vertoonde.

Enkelstrooksrotonde Schipluiden

De rotonde van Schipluiden is een rotonde met vier takken, gelegen op de N468 ter hoogte van de A4, afrit 13 (Den Hoorn). De noordelijke tak is de N468 richting de N223. Een paar honderd meter ten noorden van de rotonde sluit de N468 aan op de N223. De westelijke tak leidt naar een parkeerplaats waar weinig verkeer vandaan komt. De zuidtak is de N468 richting Schipluiden. De oostelijke tak is de verbindingsweg met de A4. Gemeten is op de oostelijke tak komend vanaf de A4. Drie meetsessies hebben hierop plaatsgevonden.
De middengeleider van de toerit heeft een breedte van circa 2,5 meter. De buitendiameter van de rotonde bedraagt 37 meter.

Figuur 4-8: Situatie Schipluiden

Tijdens de eerste sessie was er af en toe neerslag. De tweede sessie is uitgevoerd onder droge omstandigheden. De eerste meetsessie is uitgevoerd op 20 november 2001 tussen 15:54 uur en 18:15 uur door de TU Delft. De omstandigheden waren gunstig. Tijdens het meten was er sprake van een wachtrij op de toerit dit leverde 26 capaciteitswaarnemingen. De overige twee sessies zijn uitgevoerd door Goudappel Coffeng op vrijdag 18 oktober 2002 tussen 15:15 uur en 17:45 uur en op dinsdag 29 oktober 2002 tussen 6:50 uur en 9:00 uur. Ook bij deze metingen was er sprake van een wachtrij op de toerit, dit leverde respectievelijk 30 en 11 capaciteitswaarnemingen op. In Totaal zijn er dus 67 capaciteitswaarnemingen beschikbaar.

Enkelstrooksrotonde Papendrecht

De rotonde van Papendrecht is een viertaks rotonde, gelegen op de op de kruising van de N214 met de parallelweg van de A15. De noordtak is de N214 richting Meerkerk, de zuidtak is de N214 richting de A15. De westtak is de Provinciale weg richting Oud-Alblas. De oostelijke tak is doodlopend en hierop rijdt bijna geen verkeer. De buitendiameter van de rotonde bedraagt 37 meter en de breedte van de middengeleider op de toerit is circa 8 meter. De toerit is gelegen in een flauwe bocht op een lichte helling. De meting heeft plaatsgevonden op de noordelijke tak van de N214 komend vanuit de richting Meerkerk.

Figuur 4-9: Situatie Papendrecht

Op deze rotonde heeft één meetsessie plaatsgevonden op maandag 19 november 2001 tussen 7:00 uur en 8:45 uur, dit heeft 15 capaciteitswaarnemingen opgeleverd. De omstandigheden waren niet optimaal. Het was weliswaar droog en windstil maar mist belemmerde mogelijk het uitzicht. Er was sprake van een lange wachtrij voor de rotonde en dit is mogelijk van invloed het rijgedrag van de automobilisten. Rijden in een file verlaagt over het algemeen het attentieniveau.

Enkelstrooksrotonde Bergschenhoek

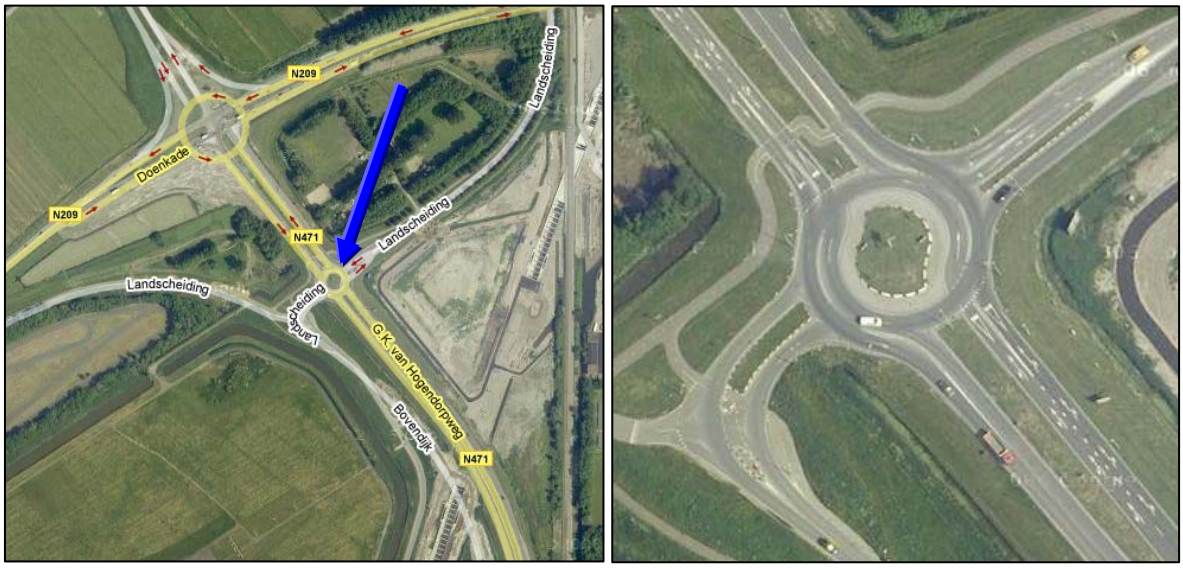
De rotonde van Bergschenhoek is een viertaks rotonde, gelegen op de kruising van de N472 met de Bergweg-Noord. De noordelijke poot is de Boterdorpseweg (N472) richting Berkel en Rodenrijs en de oostelijke is de Bergweg-Noord richting Bergschenhoek. De zuidelijke tak is de Boterdorpseweg richting Rotterdam-Hillegersberg en de westelijke is de verbindingsweg met de N209. Deze rotonde heeft een grotere buitendiameter dan de overige rotondes van circa 50 meter. Gemeten is de capaciteit van de oostelijke toerit vanuit Bergschenhoek. De breedte van deze middengeleider is circa 2,5 meter. Op deze tak heeft een capaciteitsmeting plaatsgevonden. De noordelijke toerit heeft een middengeleider met een breedte van ruim 10 meter. Van deze toerit zijn alleen visuele tellingen beschikbaar.

Figuur 4-10: Situatie Bergschenhoek

De meting heeft plaatsgevonden op woensdag 6 november 2002 tussen 7:00 uur en 9:00 uur en leverde 15 waarnemingen op. Van de noordelijke tak is een visuele telling met 15 capaciteitswaarnemingen beschikbaar.

Turborotonde Rotterdam

De turborotonde van Rotterdam is een viertaks rotonde, gelegen op de kruising van de N471 met de Landscheiding te Rotterdam. De N471 (G.K. van Hogendorpweg) is de verbindingsweg tussen de A20 en de N209. De noord- en zuidtak zijn de N471. De oosttak is de Landscheiding richting Berkel en Rodenrijs. De westelijke tak is ook Landscheiding maar heeft bijna geen verkeer. Ten noorden van de turborotonde sluit de N471 aan op de N209.



Figuur 4-11: Situatie Turborotonde Rotterdam

Op deze rotonde hebben drie onderzoeken plaatsgevonden. De capaciteit werd gemeten op de oostelijke tak van de Landscheiding, hier werd de linker rijstrook gemeten. Het eerste onderzoek is uitgevoerd door DHV op 26 april 2001 en leverde 7 capaciteitswaarnemingen op. De andere twee metingen vonden plaats op 30 oktober 2002 tussen 6:50 uur en 9:00 uur en op 5 november tussen 7:00 en 9:00 uur en leverden respectievelijk 7 en 12 capaciteitswaarnemingen op. In totaal zijn er 26 capaciteitswaarnemingen beschikbaar.

Turborotonde Reeuwijk

De turborotonde van Reeuwijk is een drietaks rotonde, gelegen op de N459 ter hoogte van de A12, afrit 12.

Op deze rotonde hebben twee onderzoeken plaatsgevonden op opeenvolgende dagen. De intensiteiten werden gemeten op de zuidelijke tak van de N459. Hier werden zowel de linker als de rechter rijstrook gemeten. Ook is de rotonde-intensiteit gemeten. Beide metingen zijn uitgevoerd door de TU, de eerste op 18 juni 2004 tussen 6:30 uur en 18:30 uur en de tweede op 19 juni 2004 tussen 8:30 uur en 18:30 uur. Tijdens de metingen was er geen sprake van congestie op de toerit gedurende lange periodes (periodes langer dan vijf minuten). Hierdoor is de data niet geschikt voor het gezamenlijk schatten van de parameters, omdat de gemeten toeritintensiteiten niet kunnen worden geïnterpreteerd als capaciteitswaarden.
De data kan waarschijnlijk gebruikt worden voor het bepalen van het kritisch hiaat en de opvolgtijd op de rotonde.

Figuur 4-12: Situatie Turborotonde Reeuwijk

4.5 Resultaten

In dit deel van het rapport worden de resultaten van de verschillende berekeningen behandeld. De resultaten van de afzonderlijke schattingen worden het meest betrouwbaar geacht en geldig voor alle soortgelijke rotondes. Daarom worden eerst de resultaten van de afzonderlijke schatting weergegeven.

Na de resultaten van de afzonderlijke schatting worden de resultaten van de gezamenlijke schatting weergegeven. Als laatst wordt ook een gecombineerde schatting gedaan waarin de resultaten van de capaciteitsformules, met afzonderlijk bepaalde parameters, worden getoetst aan de 5-minuut capaciteitsresultaten. Dit kan worden gezien als validatie van de modellen.

4.5.1 Resultaten afzonderlijke schatting

De afzonderlijke schatting van de modelparameters: kritisch hiaat (t_C), minimale volgtijd (t_M) en oprijvolgtijd (t_F) is uitgevoerd zoals beschreven in paragraaf 4.3.2. De data waaruit de verschillende parameters zijn bepaald is afkomstig uit de praktijkwaarnemingen die zijn beschreven in paragraaf 4.4.

Algemeen

De parameters zijn bepaald voor de verschillende rotondes en de resultaten zullen in deze paragraaf per rotonde worden vermeld. Na het bepalen van de waarden van de bovengenoemde parameters zal afsluitend een lineaire relatie worden onderzocht tussen φ en Q_R.
In deze paragraaf zullen alleen de eindresultaten worden vermeld. Een gedetailleerdere rapportage van de afzonderlijke schatting is te vinden in Bijlage A.
De resultaten die zijn weergegeven gelden alleen voor personenauto's. De data die is gebruikt voor het bepalen van de parameters bevatten ook alleen volgtijden en oprijvolgtijden van personenauto's. De volg- en oprijvolgtijden van de overige verkeerscategorieën worden niet meegenomen. De resultaten waarvoor ook de overige voertuigcategorieën zijn meegenomen zijn opgenomen in
Bijlage A.

Vanwege deze verschillende omstandigheden is niet elke meting geschikt is voor het bepalen van elke parameter. Vooral de hoeveelheid rotondeverkeer is van invloed. Veel rotondeverkeer leidt tot veel bruikbare combinaties van geaccepteerde en verworpen hiaten, en tot het dicht op elkaar rijden van het rotondeverkeer wat nodig is voor een goede bepaling van t_M en t_C. Weinig rotondeverkeer leidt tot veel hiaten in de hoofdstroom waar meer dan één voertuig gebruik van kan maken, wat nodig is voor het bepalen van t_F.

Enkelstrooksrotonde Schipluiden

De drie verschillende metingen op de enkelstrooksrotonde van Schipluiden zijn gedaan onder verschillende omstandigheden, te weten:

- 20-11-2001: avondspits, droge weersomstandigheden, veel toeritverkeer, weinig rotondeverkeer
- 18-10-2002: avondspits, af en toe neerslag, veel toeritverkeer, redelijke hoeveelheid rotondeverkeer
- 29-10-2002: ochtendspits, droge weersomstandigheden, weinig toeritverkeer, veel rotondeverkeer

Bij het bepalen van de parameters bleek dat de meting van 29-10-2002 geschikt is voor het bepalen van t_G, de meting van 29-10-2002 ook geschikt is voor het bepalen t_M en de metingen van 18-10-2002 en 21-11-2001 geschikt zijn voor het bepalen van t_F.

Tabel 4-1 toont de resultaten van de bepaling van de drie parameters. In deze tabel zijn alleen de resultaten weergegeven die zijn bepaald uit de data van de meest geschikte meting. De resultaten uit de overige metingen zijn weergegeven in Bijlage A.

Tabel 4-1: Resultaten Schipluiden	
Parameter	**Resultaat [s]**
Kritisch hiaat (t_C)	3,0
Minimum volgtijd (t_M)	2,2
Oprijvolgtijd (t_F)	2,1

Enkelstrooksrotonde Papendrecht

Op de rotonde van Papendrecht is één meting uitgevoerd onder matige weersomstandigheden. De aanwezige mist zou kunnen zorgen voor een voorzichtiger rijgedrag van het verkeer. Daarnaast was er sprake van weinig rotondeverkeer.

Bij het bepalen van de parameters uit de data is gebleken dat uit deze meting geen betrouwbare resultaten zijn te halen. Voor t_C leverde de data zes geschikte combinaties op van verworpen en geaccepteerde hiaten en dit is te weinig om het resultaat betrouwbaar te noemen. De geringe hoeveelheid rotondeverkeer heeft tot gevolg dat de volgtijdverdeling nagenoeg plat is. Hierdoor is het onmogelijk een waarde voor t_M te bepalen.
De meting leverde wel 962 waarnemingen op van twee achtereenvolgende voertuigen die gebruik maakten van een hiaat, en is daarmee geschikt voor het bepalen van t_F. Het resultaat licht echter wel een stuk hoger dan bij Schipluiden (2,1 s ten opzichte van 2,5 s) wat doet vermoeden dat de mistige omstandigheden het rijgedrag heeft beïnvloed.

Vanwege de onbetrouwbaarheid van de resultaten zullen de bepaalde parameters uit deze meting verder niet worden gebruikt, desalniettemin zijn de resultaten weergegeven in Tabel 4-2.

Tabel 4-2: Resultaten Papendrecht	
Parameter	**Resultaat [s]**
Kritisch hiaat (t_C)	-
Minimum volgtijd (t_M)	-
Oprijvolgtijd (t_F)	2,5

Enkelstrooksrotonde Bergschenhoek (oostelijke toerit)

De weersomstandigheden tijdens de meting in Bergschenhoek waren goed en er was sprake van veel rotondeverkeer. De enkelstrooksrotonde van Bergschenhoek wijkt in rotondediameter af van die van Schipluiden, 37 m bij Schipluiden ten opzichte van 50 m bij Bergschenhoek. Hierdoor is de snelheid van het rotondeverkeer waarschijnlijk hoger dan op Schipluiden, wat van invloed zou kunnen zijn op t_C en t_M. Ook de breedte van de middengeleider wijkt af van Schipluiden, 2,5 m voor Schipluiden ten opzichte van 10 m bij Bergschenhoek. Dit zou van invloed kunnen zijn op t_F.

Bij het bepalen van de parameters is gebleken dat alle parameters betrouwbaar kunnen worden bepaald (zie Bijlage A). De data leverde voldoende bruikbare combinaties op voor t_C, t_M en t_F. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 4-3.

Wanneer de resultaten van Bergschenhoek vergeleken worden met die van Schipluiden valt op dat de waarde van t_M redelijk overeenkomt maar dat de waarden van t_C en t_F afwijken. De t_C van Bergschenhoek (3,3 s) ligt hoger dan bij Schipluiden (3,0 s) en dit is waarschijnlijk het gevolg van de grote diameter van de rotonde van Bergschenhoek. De lagere waarde van t_F, Bergschenhoek (1,8 s) en Schipluiden (2,1 s), wordt waarschijnlijk verklaart door de combinatie van grotere rotondediameter en bredere middengeleider. Dit heeft tot gevolg dat het toeritverkeer onder een kleinere hoek moet invoegen in het rotondeverkeer, waardoor de voertuigen sneller achter elkaar kunnen invoegen.

Tabel 4-3: Resultaten Bergschenhoek

Parameter	**Resultaat [s]**
Kritisch hiaat (t_C)	3,3
Minimum volgtijd (t_M)	2,1
Oprijvolgtijd (t_F)	1,8

Turborotonde Rotterdam

Tijdens de metingen op de turborotonde te Rotterdam waren de weersomstandigheden goed te noemen. Daarnaast was sprake van redelijk weinig rotondeverkeer en redelijk veel toeritverkeer.
Bij deze meting dient vermeld te worden dat de capaciteitstoestand op de rotonde is verkregen door een aantal personenauto's over de rotonde rondjes te laten rijden. Aangezien het in principe niet mogelijk is om een meerdere rondjes te rijden op een turborotonde, werd de rotonde foutief genomen door steeds de binnenste rotondestrook aan te houden. Dit heeft tot gevolg gehad dat de binnenste rotondestrook zwaarder werd belast dan de buitenste, zodat er geen sprake was van een evenredige verdeling van het rotondeverkeer over de twee rotondestroken. Dit zou van invloed kunnen zijn op de resultaten.

Bij het bepalen van de parameters is gebleken dat de relatief geringe hoeveelheid rotondeverkeer het bepalen van t_M niet mogelijk maakt. Ook de hoeveelheid bruikbare combinaties van verworpen en geaccepteerde hiaten laat te wensen over. De waarde van t_F kan wel met voldoende betrouwbaarheid worden bepaald. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 4-4.

Wanneer de resultaten van Rotterdam worden vergeleken met die van Schipluiden valt op dat de waarde van t_F redelijk overeenkomt maar dat de waarden van t_C afwijken. De t_C van Rotterdam (3,3 s en 3,6 s) ligt hoger dan bij Schipluiden (3,0 s). Dit zou verklaard kunnen worden door de lage hoeveelheid rotonde verkeer. Het verschil in t_C tussen de binnenste en de buitenste rotondestrook kan worden verklaard door enerzijds het verschil in snelheid op de rotondestroken en anderzijds door de onevenredige verdeling van het verkeer over de stroken.

Tabel 4-4: Resultaten Rotterdam

Parameter	**Resultaat [s]**
Kritisch hiaat (t_C) binnen	3,3
Kritisch hiaat (t_C) buiten	3,6
Minimum volgtijd (t_M)	-
Oprijvolgtijd (t_F)	2,2

Turborotonde Reeuwijk

Gedurende metingen op de turborotonde te Reeuwijk waren de weersomstandigheden goed maar de hoeveelheid verkeer liet te wensen over. Vooral tijdens de meting van 19-6-2004 waren de intensiteiten laag. Voor alle metingen gold dat er geen sprake was van een capaciteitstoestand. Dit zorgde er voor dat het verkeer geen gebruik maakte van de kleinere hiaten in de rotondestroom. Hierdoor zou het kritisch hiaat te hoog uit kunnen vallen. De metingen leverde wel voldoende bruikbare combinaties op voor t_C, t_M en t_F. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 4-5.

Wanneer de resultaten worden vergeleken met die van de overige rotondes valt op dat t_C relatief hoog uitvalt. De waarden van t_M en t_F komen wel overeen met de resultaten van de overige rotondes.

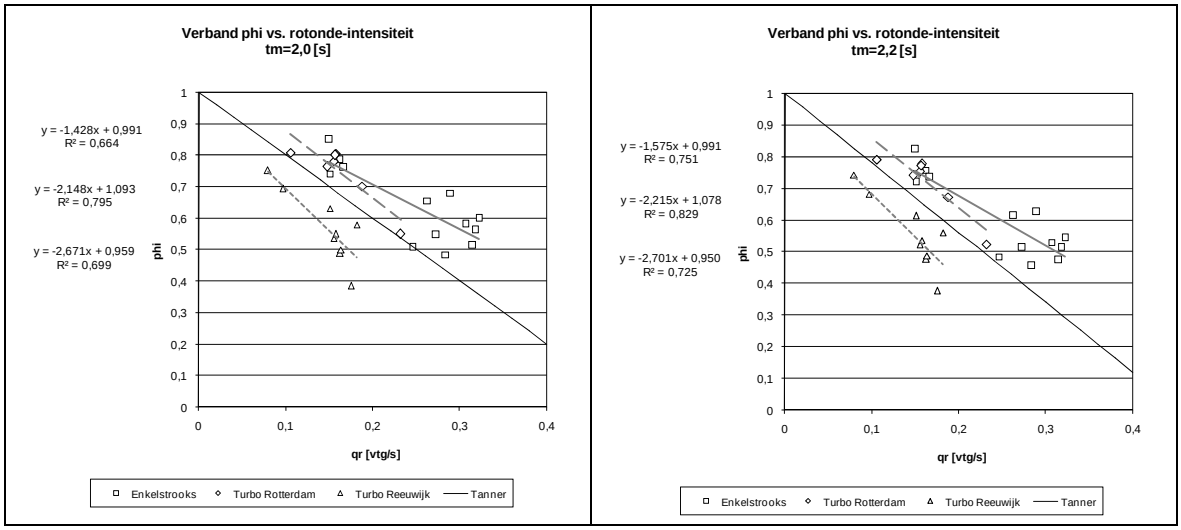
Tabel 4-5: Resultaten Reeuwijk

Parameter	**Resultaat [s]**
Kritisch hiaat (t_C) links	3,8
Kritisch hiaat (t_C) rechts	3,6
Minimum volgtijd (t_M) links	2,2
Minimum volgtijd (t_M) rechts	2,2
Oprijvolgtijd (t_F) links	2,1
Oprijvolgtijd (t_F) rechts	2,1

Percentage vrije voertuigen φ

De waarde van φ is bepaald voor de verschillende rotondes. De verschillende datasets met volgtijden, behorende bij de verschillende rotondes, zijn opgedeeld in datasets van ongeveer 250 waarnemingen. De φ is bepaald voor een t_M van 1,8, 2,0 en 2,2. Uit de bovenstaande bepaling van t_M is gebleken dat deze moet liggen tussen de 2,0 en de 2,2. Figuur 4-13 toont de resultaten. Omdat de resultaten van de enkelstrooks rotondes sterk overeen kwamen is gekozen om deze samen te voegen.

Uit de resultaten blijkt dat het verband sterker wordt naarmate de t_M hoger wordt gekozen. Daarnaast valt op dat de relatie volgens Tanner een goede beschrijving geeft van de algemene situatie.
Vanwege de hogere waarde voor R^2 worden de resultaten voor t_M=2,2 gebruikt bij verdere berekeningen.



Figuur 4-13: Bepaling relatie: φ - q_R

De parameters van de regressielijn zijn weergeven in Tabel 4-6 en Tabel 4-7.

Tabel 4-6: Relatie φ v.s. q_R voor t_M=2,0 [s]				
Meting	**Aant. punten.**	**intercept**	**helling**	**R^2**
Enkelstrooks	13	0,992	-1,428	0,664
Turbo Rotterdam	7	1,094	-2,149	0,795
Turbo Reeuwijk	9	0,960	-2,672	0,700

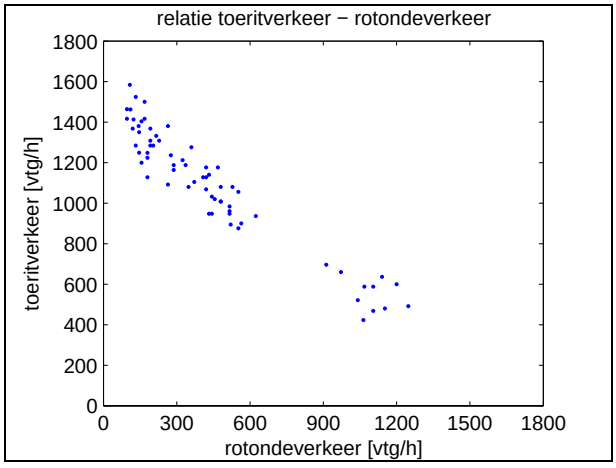
Tabel 4-7: Relatie φ v.s. q_R voor t_M=2,2 [s]				
Meting	**Aant. punten.**	**intercept**	**helling**	**R^2**
Enkelstrooks	13	0,991	-1,575	0,751
Turbo Rotterdam	7	1,079	-2,216	0,829
Turbo Reeuwijk	9	0,951	-2,702	0,726

4.5.2 Resultaten gezamenlijke schatting

In dit deel van het rapport worden de relevante resultaten gegeven van de bepaling van de verschillende parameters door middel van de gezamenlijke schatting. Deze schatting is uitgevoerd zoals beschreven in paragraaf 4.3.2. De resultaten zullen worden weergegeven per rotonde. Indien parameters niet geschat kunnen worden, zullen deze worden overgenomen van een vergelijkbare rotonde. Deze overgenomen parameters zullen hier niet worden vermeld, dit zal alleen worden gedaan voor de geschatte parameters. Een compleet overzicht van de resultaten en een gedetailleerde beschrijving van de procedure is gegeven in Bijlage B. Nadat de resultaten voor alle rotondes zijn behandeld volgt een samenvatting waar de resultaten worden vergeleken met die van de afzonderlijke schatting.

Enkelstrooksrotonde Schipluiden

De metingen op de rotonde van Schipluiden hebben zeer bruikbare data opgeleverd die goed kunnen worden gebruikt voor het gezamenlijk schatten van de modelparameters. De belangrijkste relatie, de relatie tussen de toeritcapaciteit en de rotonde-intensiteit, is weergegeven in Figuur 1-1. Hierin is zichtbaar dat de data een duidelijke relatie laat zien en waarnemingen heeft over een groot deel van het intensiteitbereik. De resultaten van de schatting is weergegeven in Tabel 4-8. Uit de resultaten blijkt dat deze redelijk constant zijn en daardoor waarschijnlijk redelijk betrouwbaar. Verder is alleen de data van deze rotonde bruikbaar gebleken voor het bepalen van de pea-waarden. De pea-waarden die voor deze rotonde zijn berekend, zijn ook gebruikt voor de overige rotondes.



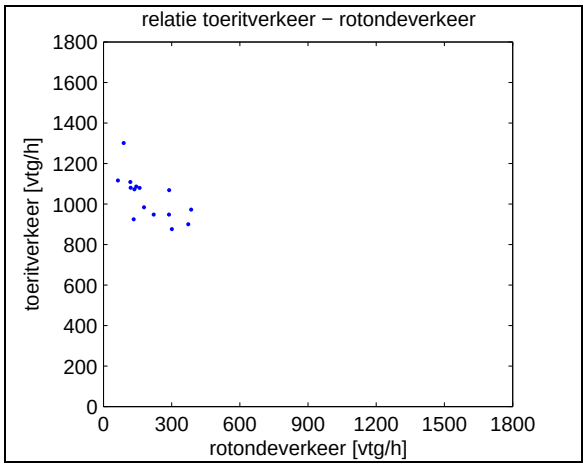
Figuur 4-14: relatie toeritverkeer – rotondeverkeer Schipluiden

Tabel 4-8: Resultaten van de gezamenlijke schatting Schipluiden

Bovy		Brilon		Tanner		Troutbeck	
Pae 1	1,90	Pae 1	1,90	Pae 1	1,90	Pae 1	1,90
Pae 2	2,40	Pae 2	2,40	Pae 2	2,40	Pae 2	2,40
C0	1622	C0	1768	tm	1,32	tm	1,35
b	0,86	B	8,51	tc	3,65	tc	3,76
a	0,21	d	0,28	tf	2,10	tf	2,07
d (a/b)	0,24			d	0,27	d	0,33
MSE	5358	MSE	4871	MSE	4657	MSE	4884

Enkelstrooksrotonde Papendrecht

De meetresultaten van Papendrecht zijn van slechte kwaliteit gebleken. De twee grootste gebreken aan de data zijn de zeer lage waargenomen capaciteit en de concentratie van de waarnemingen in een relatief klein gebied. Waarschijnlijk hebben de weersomstandigheden en de lange wachtrij gezorgd voor een negatief effect op het rijgedrag. Na analyse van de data, zie Bijlage B, is gebleken dat niet alle parameters geschat kunnen worden. De resultaten van de parameters die wel geschat kunnen worden zijn weergegeven in Tabel 4-9.



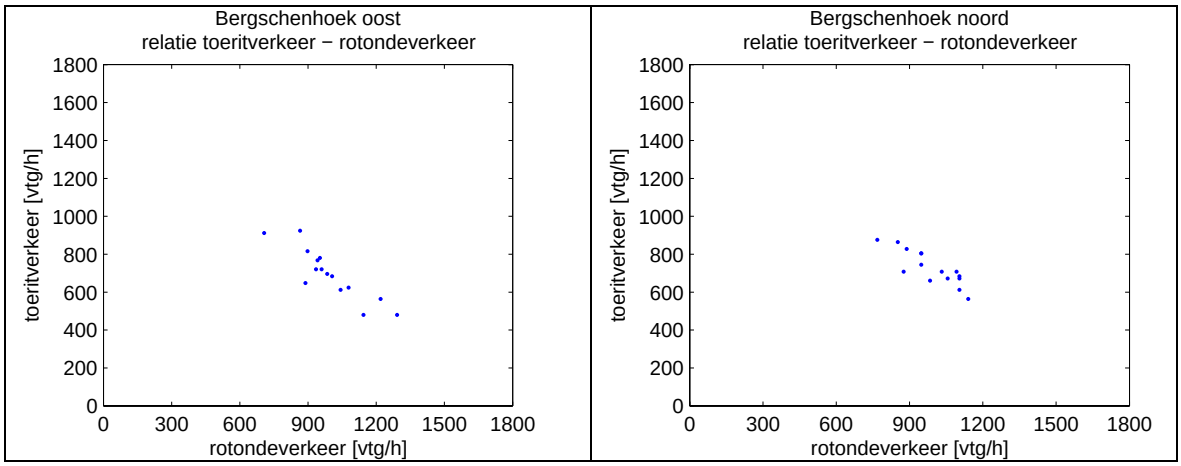
Figuur 4-15: relatie toeritverkeer – rotondeverkeer Papendrecht

Tabel 4-9: Resultaten van de gezamenlijke schatting Papendrecht

Bovy		Brilon		Tanner		Troutbeck	
C0	1479	C0	1456	tm	-	tm	-
b	0,89	B	-	tc	-	tc	-
a	-	d	0,11	tf	2,61	tf	2,60
d (a/b)	0,24			d	0,10	d	0,09
MSE	3140	MSE	2971	MSE	2898	MSE	2878

Enkelstrooksrotonde Bergschenhoek

De metingen in Bergschenhoek hebben redelijk bruikbare data opgeleverd. De hoeveelheid data is beperkt en is geconcentreerd in een relatief klein gebied, maar de kwaliteit van de data is overwegend goed. De meetgegevens mogen echter niet samengevoegd worden vanwege de verschillen in vormgeving tussen de twee toeritten. De noordelijke tak heeft een bredere middengeleider dan de oostelijke tak. Vanwege het ontbreken van toeritcapaciteiten voor weinig rotondeverkeer en niet overtuigende onafhankelijkheid tussen de verkeerstromen bij de noordelijke meting kunnen niet alle parameters worden geschat. De parameters die wel zijn geschat zijn weergegeven in Tabel 4-10 en Tabel 4-11.



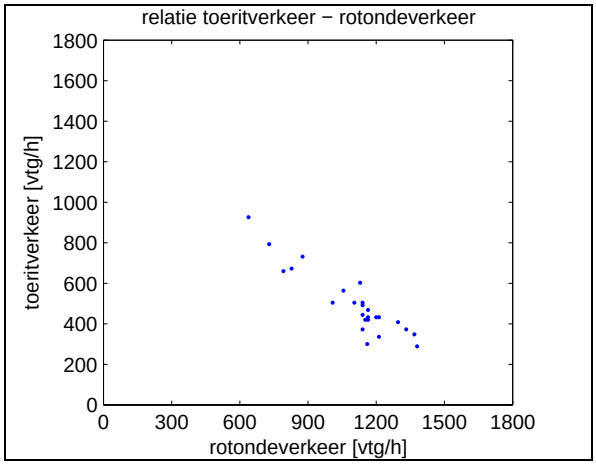
Figuur 4-16: relatie toeritverkeer – rotondeverkeer Bergschenhoek

Tabel 4-10: Resultaten van de gezamenlijke schatting Bergschenhoek oost							
Bovy		Brilon		Tanner		Troutbeck	
C_0	-	C_0	-	tm	-	tm	-
b	0,86	B	9,01	tc	3,71	tc	3,86
a	-0,01	d	-0,19	tf	-	tf	-
d (a/b)	-0,01			d	-0,09	d	-0,07
MSE	3024	MSE	3513	MSE	2993	MSE	3284

Tabel 4-11: Resultaten van de gezamenlijke schatting Bergschenhoek noord							
Bovy		Brilon		Tanner		Troutbeck	
C_0	-	C_0	-	tm	-	tm	-
b	0,69	B	6,82	tc	2,94	tc	2,94
a	-	d	-	tf	-	tf	-
d (a/b)	0,30			d	-	d	-
MSE	2249	MSE	2986	MSE	2249	MSE	2610

Turborotonde Rotterdam

De turborotonde is een tweestrooks- in plaats van een enkelstrooksrotonde. De formules van Tanner en Troutbeck kunnen hier dus niet worden toegepast. Daarnaast wijkt de turborotonde af van de conventionele tweestrooksrotonde, omdat er op de rotonde niet van rijstrook hoeft te worden gewisseld. De meetresultaten geven alleen intensiteiten van de linker toeritstrook, hierdoor zijn alleen de formules bruikbaar die gelden per toeritstrook. De formule van Brilon geeft een toeritcapaciteit van de gehele toerit en niet van een enkele toeritstrook, hierdoor is de formule van Brilon niet bruikbaar. Alleen de formules van Bovy, Fisk en Hagring zullen worden behandeld.



Figuur 4-17: relatie toeritverkeer – rotondeverkeer Rotterdam

Tabel 4-12: Resultaten van de gezamenlijke schatting Rotterdam

Bovy		Fisk		Hagring	
C0	1381	tm	2,25	tm	2,02
a	0,02	tc,1	4,17	tc,1	4,17
b, licht	0,76	tc,2	4,53	tc,2	4,44
b, zwaar	0,69	tf	1,88	tf	1,90
		d	0,00	d	0,00
MSE	2268	MSE	1919	MSE	1933

Wat opvalt is dat de waarden van de kritisch hiaten hoger liggen (4,2 en 4,5 t.o.v. 3,7) dan bij de enkelstrooksrotonde. Daarnaast valt op dat de parameter *d* de waarde nul aanneemt. Dit betekent dat het afslaande verkeer weinig invloed heeft op het proces. De waarden van t_F en t_M komen, in tegenstelling tot de resultaten van de enkelstrooks rotondes, sterk overeen met de resultaten van de afzonderlijke schatting.

Samenvatting van de resultaten

In deze paragraaf zal in tabelvorm een overzicht worden gegeven van de bepaalde parameters. Ter vergelijking zijn ook de resultaten van de afzonderlijke schatting weergegeven. Achtereenvolgens zullen de volgende parameters worden behandeld: a, b, C_0, B, d, t_C, t_M en t_F. De parameters die zijn overgenomen zijn weggelaten.

Tabel 4-13: Parameters voor verkeersstroommodellen

Rotonde	a	b	C0 Bovy	C0 Brilon
Schipluiden	0,21	0,86	1622	1768
Papendrecht	-	0,89	1479	1456
Bergschenhoek Oost	-0,01	0,86	-	-
Bergschenhoek Noord	-	069	-	-
Rotterdam zwaar	0,02	0,76	1381	-
Rotterdam ligt		0,69		

Tabel 4-14: Parameters voor schijnconflict

Rotonde	Bovy	Brilon	Tanner / Fisk	Troutbeck / Hagring
Schipluiden	0,24	0,28	0,27	0,33
Papendrecht	0,24	0,11	0,10	0,09
Bergschenhoek Oost	-0,01	-0,19	-0,09	-0,07
Bergschenhoek Noord	0,30	-	-	-
Rotterdam	0,02	-	0,00	0,00

Tabel 4-15: Parameters voor kritisch hiaat t_C

Rotonde	Tanner / Fisk	Troutbeck / Hagring	Afzonderlijke schatting
Schipluiden	3,7	3,8	3,0
Papendrecht	-	-	-
Bergschenhoek, Oost	3,7	3,8	3,3
Bergschenhoek, Noord	2,9	2,9	-
Turbo R'dam tC,I	4,2	4,2	3,3
Turbo R'dam tC,U	4,5	4,4	3,6
Turbo Reeuwijk Li	-	-	3,8
Turbo Reeuwijk Re	-	-	3,6

Tabel 4-16: Parameters voor minimale volgtijd t_M

Rotonde	Tanner / Fisk	Troutbeck / Hagring	Afzonderlijke schatting
Schipluiden	1,3	1,4	2,2
Papendrecht	-	-	-
Bergschenhoek	-	-	2,1
Turbo Rotterdam	2,3	2,0	-
Turbo Reeuwijk	-	-	2,2

Tabel 4-17: Parameters voor oprijvolgtijd t_F

Rotonde	Tanner / Fisk	Troutbeck / Hagring	Afzonderlijke schatting
Schipluiden	2,10	2,07	2,1
Papendrecht	2,61	2,60	2,5
Bergschenhoek	-	-	1,8
Turbo R'dam	1,88	1,90	2,2
Turbo Reeuwijk, Li	-	-	2,2
Turbo Reeuwijk, Re	-	-	2,2

Uit de resultaten blijkt dat de uitkomsten van de gezamenlijke schatting niet overeenkomen met die van de afzonderlijke. Het verschil in kritisch hiaat voor Schipluiden ligt in de orde van grootte van één seconde. Een dergelijk verschil heeft een grote invloed op de capaciteit en daarom is het noodzakelijk de verklaring van dit verschil te achterhalen.

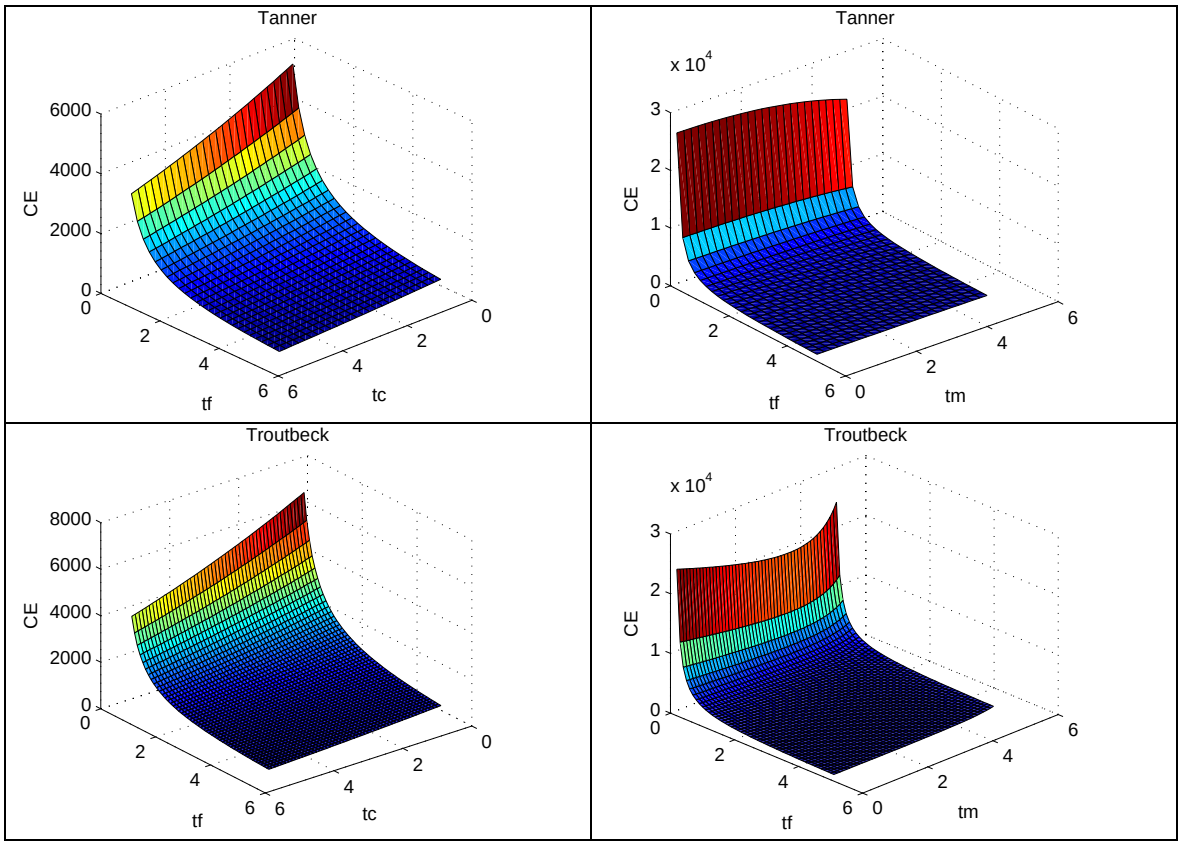
Het verschil zou verklaard kunnen worden door het feit dat de resultaten van de afzonderlijke schatting direct uit de data zijn te halen en dat de resultaten van de gezamenlijke schatting het resultaat zijn van een iteratief proces. De resultaten van dit proces zijn getallen die het best bij de gemeten vijf-minuten-intensiteiten passen. Vanwege het grote aantal onbekenden (3 voor Tanner tot 7 voor Hagring) is het de vraag of deze uitkomsten wel representatief zijn voor de desbetreffende parameter. Ook kunnen eventuele onderlinge correlaties/afhankelijkheden van de parameters het effect hebben dat ze elkaars invloed opheffen, met andere woorden: een verhoging van de ene parameter en een verlaging van de andere kan leiden tot een onveranderde uikomst.

In theorie zal de betrouwbaarheid van de gezamenlijke schatting toenemen, wanneer het aantal onbekenden wordt teruggebracht. Het terugbrengen van het aantal onbekenden kan door de, betrouwbaarder geachte, uitkomsten uit de afzonderlijke schatting in te vullen. Dit wordt verder uitgewerkt in paragraaf 4.5.3.

4.5.3 Resultaten gecombineerde schatting

In de paragrafen 4.5.1 en 4.5.2 zijn de verschillende parameters op twee manieren bepaald, te weten: afzonderlijk en gezamenlijk. In deze paragaaf wordt gekeken naar de uitkomsten van een nieuwe gezamenlijke schatting, waarbij de resultaten van de afzonderlijke schatting worden gebruikt. De vraag is alleen: Welke parameters kunnen het best vast worden gezet? Om dit te bepalen wordt er gekeken naar de invloed van de verschillende parameters in de capaciteitsformule. Deze analyse is gedaan in Matlab door de verschillende parameters tegen elkaar uit te zetten en te kijken wat de invloed is op de capaciteit. Omdat alle hiaatacceptatiemodellen gebaseerd zijn op óf Tanner óf Troutbeck, worden alleen deze twee formules behandeld.

Figuur 4-18 toont de figuren behorende bij Troutbeck en Tanner. Hieruit valt te concluderen dat de oprijvolgtijd t_F, in het gebied tussen 0 en 2 seconden, een grotere invloed heeft op de capaciteit dan de t_C en de t_M. Daarnaast is een afwijkend verband te zien in t_M in het figuur van Troutbeck. Dit is het gevolg van een constant aangenomen percentage vrije voertuigen wat in werkelijkheid afhankelijk is van t_M. Aan de hand van deze constateringen is besloten t_M en t_F vast te zetten en t_C te laten variëren.



Figuur 4-18: Grafische weergave van de invloed van de verschillende parameters in de capaciteitsformules

De resultaten voor het kritisch hiaat zijn getoond in Tabel 4-18. Weergegeven zijn de nieuwe gezamenlijk geschatte waarden en, ter vergelijking, de afzonder geschatte waarden.

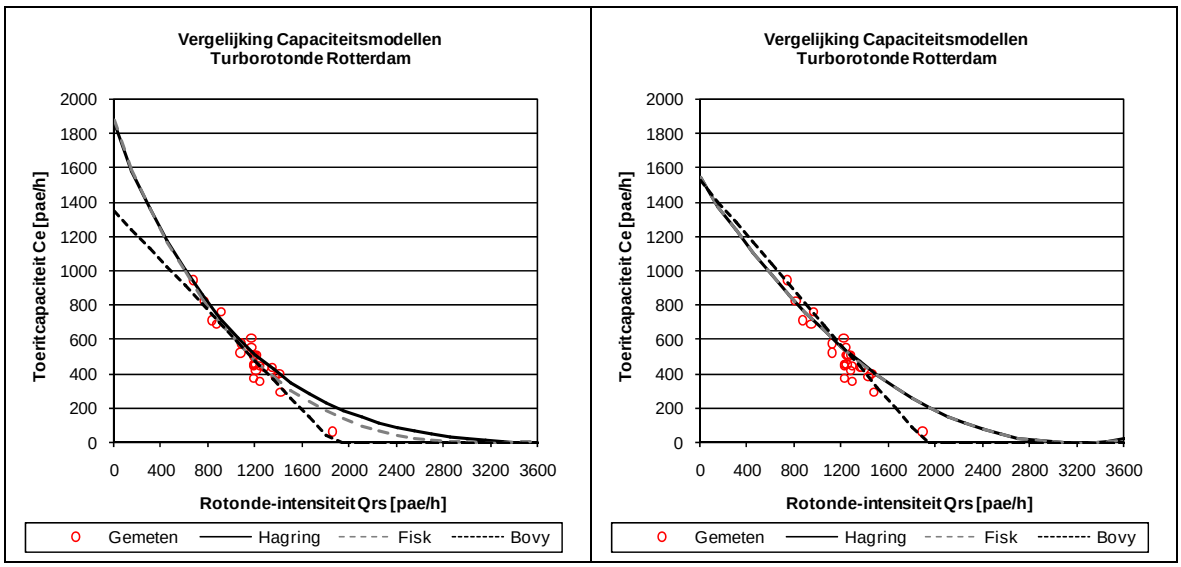
Tabel 4-18: Resultaten t_C voor de gecombineerde schatting

Meting	Tanner / Fisk	Troutbeck / Hagring	Maximum Likelihood
Schipluiden	3,2	3,1	3,1
Papendrecht	3,1	3,1	-
Bergschenhoek	3,2	3,1	3,3
Turbo Rotterdam binnen	4,2	3,9	3,3
Turbo Rotterdam buiten	4,0	4,1	3,6

Uit deze resultaten in Tabel 4-18 blijkt dat de uitkomsten van de enkelstrooksrotondes zeer goed met elkaar overeenkomen. Voor de turborotonde komen de uitkomsten niet overeen. Dit betekent dat de capaciteitsmodellen van de enkelstrooksrotondes, die gebaseerd zijn op de hiaatacceptatietheorie, in combinatie met de in deze studie gevonden parameters, goed bruikbaar zijn voor de Nederlandse situatie. Voor de Turborotonde is dit niet het geval.

Bij de schatting van de parameters voor de turborotonde is duidelijk iets aan de hand. Om te achterhalen wat dit is zijn twee figuren gemaakt waarin respectievelijk de gezamenlijk en de afzonderlijk bepaalde parameters zijn ingevuld. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 4-19. In Tabel 4-19 zijn de ingevulde parameters getoond die behoren bij het daarboven staande figuur.

In Figuur 4-19 is goed te zien dat, vanwege de concentratie van de gemeten capaciteiten in een te klein gebied, de lijn behorende bij de gezamenlijk geschatte parameters het best past bij de gemeten punten maar afwijkt voor hoge, niet gemeten, toeritcapaciteiten. Wanneer er gekeken wordt naar de lijnen behorende bij de afzonderlijk geschatte parameters blijkt dat deze wel een realistisch resultaat geven.



Figuur 4-19: Vergelijking resultaten van de capaciteitsformules voor de turborotonde met verschillende parameters

Tabel 4-19: Parameters behorende bij Figuur 4-19

Parameters Hiaatacceptatiemodel		
Parameter	**Fisk**	**Hagring**
$t_{C,I}$	4,17	4,17
$t_{C,U}$	4,53	4,44
t_M	2,25	2,02
t_F	1,88	1,90
d	0,00	0,00
φ		$1,079-2,216*q_R$

Parameters Hiaatacceptatiemodel		
Parameter	**Fisk**	**Hagring**
$t_{C,I}$	3,3	3,3
$t_{C,U}$	3,6	3,6
t_M	2,2	2,2
t_F	2,2	2,2
d	0,25	0,25
φ		$1,079-2,216*q_R$

Parameters Verkeersstroommodel	
Parameter	**Bovy**
C_0	1381
b,licht	0,76
b,zwaar	0,69
a	0,02

Parameters Verkeersstroommodel	
Parameter	**Bovy**
C_0	1600
b,licht	0,80
b,zwaar	0,80
a	0,20

4.6 Samenvatting van de resultaten

In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de bepaalde parameters voor de verschillende rotondes. Afsluitend volgt een grafische weergave van het gedrag van de capaciteitsformules met als vergelijking de gemeten waarden.

Algemeen kan worden gesteld dat de pae-waarden van 1,9 [-] voor ongelede en 2,4 [-] voor ongelede vrachtwagens moeten worden gebruikt voor zowel enkelstrooks- als turborotondes.

Verkeersstroommodellen

Enkelstrooksrotonde met rotondediameter = 37 [m] en breedte middengeleider = 2,5 [m].

Tabel 4-20			
Parameters Bovy		Parameter Brilon	
C0	1622	C0	1768
b	0,86	B	8,51
a	0,21	d	0,28
d (a/b)	0,24		

Enkelstrooksrotonde met rotondediameter = 50 [m] en breedte middengeleider = 10 [m].

Tabel 4-21			
Parameters Bovy		Parameter Brilon	
C0	1622	C0	1768
b	0,86	B	8,66
a	0,00	d	0,00
d (a/b)	0,00		

Turborotonde met twee toeritstroken en twee (doorlopende) rotondestroken, linker toeritstrook.

Tabel 4-22	
Parameters Bovy	
C0	1600
b, licht	0,80
b, zwaar	0,80
a	0,20

Hiaatacceptatiemodellen

Enkelstrooksrotonde met rotondediameter = 37 [m] en breedte middengeleider = 2,5 [m].

Tabel 4-23	
t_C	3,1
t_M	2,2
t_F	2,1
d	0,25
$\varphi = 0{,}991\text{-}1{,}575*q_R$	

Enkelstrooksrotonde met rotondediameter = 50 [m] en breedte middengeleider = 10 [m].

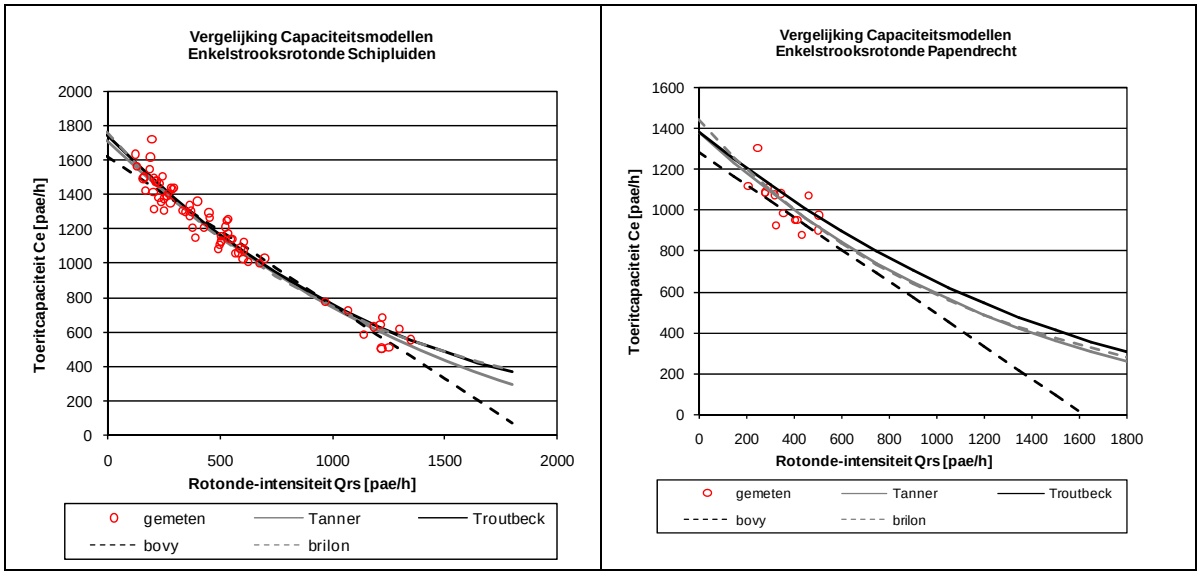
Tabel 4-24	
t_C	3,3
t_M	2,1
t_F	1,8
d	0,00
$\varphi = 0{,}991\text{-}1{,}575*q_R$	

Standaard turborotonde (alle toeritten).

Tabel 4-25	
t_C, binnen	3,3
t_C, buiten[11]	3,6
t_M	2,2
t_F	2,2
d	0,25

Grafische weergave van de modellen

Figuur 4-20 toont een grafische weergave van het gedrag van de capaciteitsmodellen na invulling van de bovenstaande parameters.



Figuur 4-20: Grafische weergave van onderzochte relaties tussen de verschillende verkeersstromen

[11] Deze waarde is het gemiddelde van de gevonden kritisch hiaten op beide turborotondes.

4.7 Conclusies analytisch model

Uit het voorgaande is gebleken dat voor de verkeersstroommodellen de gezamenlijk geschatte parameters betrouwbare resultaten geven. Voor de hiaatacceptatiemodellen geven de afzonderlijk geschatte parameters betrouwbare resultaten. Wat opvalt is dat de relatief eenvoudige formule van Bovy zeer goede resultaten geeft en dat de resultaten van de hoog gewaardeerde formule van Troutbeck tegenvallen. Dit laatste is waarschijnlijk het gevolg van de moeilijk vast te stellen relatie tussen de rotonde-intensiteit en het percentage vrije voertuigen. Wanneer deze relatie nauwkeuriger is vast te stellen zal de formule van Troutbeck betere resultaten kunnen geven. Echter geeft de beschikbare data niet de mogelijkheid dit te doen. Er zal dus moeten worden gezocht naar een andere oplossing. Een mogelijkheid is om deze relatie verder te onderzoeken met een verkeerssimulatiemodel zoals VISSIM. In het volgende deel van dit rapport zal hier meer aandacht aan worden besteed.

Verder is gebleken dat de kwaliteit van de gezamenlijk geschatte parameters zeer afhankelijk is van de beschikbare data. Wanneer de data zich beperkt tot een klein deel van het intensiteitbereik, dan kunnen de resultaten voldoen voor intensiteiten binnen dit bereik maar zeer onbetrouwbaar zijn voor intensiteiten daar buiten.

5 Simulatie model

5.1 Algemeen

Door het vaststellen van het kritisch hiaat, de minimale opvolgtijd en de oprijvolgtijd aan de hand van de gemeten data, is het rijgedrag op rotondes voor een deel bekend geworden. De invloed van de rotondevorm en de richtingsverdeling van het verkeer is nog niet bekend.
Op basis van de uitkomsten uit het eerste deel van deze studie is gebleken dat de rotondediameter wellicht van invloed is op het kritisch hiaat en het schijnconflict. Om dit te kunnen onderzoeken schiet de hoeveelheid beschikbare data tekort en daarom is gekozen voor het gebruik van een verkeerssimulatiemodel.

Voor deze studie wordt gebruik gemaakt van het computersimulatieprogramma VISSIM. Er is gekozen voor VISSIM omdat dit programma in het algemeen wordt gezien als een kwalitatief goed werkend simulatieprogramma dat de werkelijkheid realistisch en betrouwbaar simuleert. Daardoor wordt VISSIM op grote schaal toegepast voor verkeerskundige modellen.

In deze studie wordt onderzocht of het mogelijk is om een goed werkend model te maken voor een enkelstrooksrotonde en een turborotonde. Wanneer dit mogelijk is, zal het model worden gebruikt om extra onderzoek te verrichten.

De vergelijking van de modelresultaten met de resultaten van het analytisch model wordt gedaan op basis van de formules van Bovy, Troutbeck en Hagring. Hierdoor wordt de vergelijking gemaakt met zowel een verkeersstroommodel als een hiaatacceptatiemodel. Er is gekozen voor de formule van Bovy vanwege de reeds bredere toepassing in de praktijk van, ten opzichte van die van Brilon. Voor de hiaatacceptatiemodellen is gekozen voor de formules op basis van de formule van Troutbeck omdat deze de verkeersstromen gedetailleerder beschouwt.

5.1.1 Gestelde eisen aan het model

Een verkeersmodel in VISSIM zal een simulatie geven van de werkelijkheid en zal dus niet volledig overeenkomen met de werkelijkheid. Om de werkelijkheid toch zo dicht mogelijk te benaderen, kunnen binnen VISSIM een aantal instellingen worden aangepast die het rijgedrag van de voertuigen beïnvloeden. Het kalibreren van het model door het veranderen van deze instellingen moet echter wel nauwkeurig gebeuren en alle aanpassingen moeten logisch verklaard kunnen worden. Na kalibratie dient het model te voldoen aan een aantal kwalitatieve en functionele eisen.

Kwalitatieve eisen:
- Het model dient het rijgedrag van de voertuigen zodanig te simuleren dat dit nagenoeg overeenkomt met de werkelijkheid.
- De capaciteit van het rotondemodel moet overeenkomen met de gemeten capaciteit van de rotonde.
- Het model dient een realistische visuele weergave te geven van het rijgedrag.
- Het model moet toepasbaar zijn in een groter netwerk.

Functionele eisen:
- Het model moet zo simpel mogelijk zijn, zodat dit in de toekomst eenvoudig door derden kan worden gebruikt.
- Het model moet logisch en verklaarbaar zijn opgebouwd zodat het eenvoudig gereproduceerd kan worden.
- De aanpassingen aan de parameters in VISSIM moeten alleen gelden voor de rotonde en niet voor het gehele netwerk waarin de rotonde moet functioneren.

5.1.2 Opbouw van het model

Zoals genoemd in de kwalitatieve eisen dient het model simpel en verklaarbaar te zijn opgebouwd. Daarnaast moet de opbouw zodanig zijn dat het model kwalitatief goed werkt en de praktijk zo dicht mogelijk benadert. In deze paragraaf wordt in chronologische volgorde beschreven hoe het model is opgebouwd.

Het rotondemodel in VISSIM bestaat in hoofdlijnen uit de volgende basisonderdelen:
- Weginfrastructuur (links en connectors);
- Voorrangsregels (priority rules);
- Zones met gereduceerde maximumsnelheid (reduced speed areas);
- Aan en afvoer van verkeer (nodes en parking lots).
- Samenstelling van het verkeer (vehicle model, vehicle types en vehicle classes)

De tussen haakjes vermelde Engelse woorden zijn de benamingen van de termen zoals die worden gebruikt in VISSIM. Om duidelijk de link met VISSIM te houden zullen deze termen worden gebruikt in dit rapport.

Links en connectors:

Het model is opgebouwd uit verschillende links en connectors. Om de werkelijkheid zo goed mogelijk te benaderen moeten deze zo nauwkeurig mogelijk worden gemodelleerd. Voor deze studie is hiervoor gebruik gemaakt van een, in AutoCAD getekende, ondergrond.

De volgende links en connectors zijn gebruikt:
- link voor rotondestrook (één of meerdere);
- links voor rijstroken van en naar de rotonde;
- connector tussen eind en begin van de rotondestrook;
- connectors tussen rijstroken van en naar rotonde en de rotondestrook;
- connectors tussen rijstroken met algemeen rijgedrag en specifiek rotonderijgedrag.

Er is gekozen om de rotonde te laten bestaat uit één link, in het geval van een enkelstrooksrotonde, of twee links, in het geval van een turborotonde. De aan- en afvoerende wegen op de rotondetakken worden ook gemodelleerd als afzonderlijke links. Deze takken worden verbonden met de rotondestrook door connectors en deze liggen per definitie in een bocht. Bij het leggen van deze connectors worden de tangentpunten van de binnenbocht gebruikt als begin- en eindpunt van de connector. Door de connector te leggen als een "Spline" met tien punten wordt deze automatisch door VISSIM op de juiste plek geprojecteerd.
Wanneer de links en connectors op de juiste plaats liggen moeten de beginpunten van de connectors van de toe- en afritten iets verschoven worden om het model goed te laten werken. De beginpunten van de afritconnectors moeten 3,70 meter stroomopwaarts worden geschoven om het schijnconflict op de juiste manier in rekening te brengen (zie paragraaf 5.1.3). De beginpunten van de opritconnectors moeten ongeveer tien meter worden opgeschoven zodat het verkeer bij het opstellen voor de stopstreep geen last heeft van de overgang tussen de (stroomopwaartse) link en de connector.
De tot nu toe beschreven links, zijn links waarop het specifieke rotonderijgedrag geldt. Het algemene rijgedrag van het netwerk kan hiervan afwijken en daarom zijn de rotondelinks verlengd met links waarop dit algemene rijgedrag geldt. De overgangen tussen algemene en specifieke links worden gerealiseerd door connectors.

Priority rules

Het verlenen van voorrang op de rotonde wordt in VISSIM geregeld met zogehete "priority rules" (voorrangsregels). Deze voorrangsregels worden neergelegd in de vorm van stopstrepen. Met behulp van deze stopstrepen wordt aangegeven welk hiaat een voertuig benut om in te voegen. De voorrangsregels zijn gebaseerd op het voorbeeld van een rotondetoerit zoals vermeld in de VISSIM handleiding. Deze basis is aangevuld met een extra stopstreep op de rotonde die rekening houdt met lange voertuigen die de rotonde oprijden en met voertuigen die een te klein hiaat kiezen waardoor het rotondeverkeer moet afremmen. Dit is gedaan om de praktijksituaties zo goed mogelijk te simuleren.

Reduced speed areas

De gewenste snelheid op de rotonde wordt geregeld door "reduced speed areas" en worden als zones gelegd op een link of connector. De ingestelde gewenste snelheid moet overeenkomen met de snelheid waarmee voertuigen in de praktijk over de rotonde rijden. De zones die de gewenste snelheid op de rotonde bepalen worden gelegd conform de VISSIM handleiding. Deze zones worden alleen gelegd op de rotondestrook en de hierop aansluitende connectors. Op de links van en naar de rotonde wordt dit niet gedaan.

Nodes en Parkinglots

Het verkeer op een rotonde heeft een bepaalde herkomst en bestemming. Om dit model toepasbaar te maken voor een groter netwerk is het noodzakelijk dat het aanbod en de richtingsverdeling van het verkeer beschreven kan worden met een herkomst/bestemming matrix (H/B-matrix). In VISSIM is dit mogelijk door gebruik te maken van een "dynamic assignment". Hiertoe dient een "node" te worden geplaatst aan het eind/begin van iedere rotondetak en een algemene "node" over de rotonde. Het verkeer rijdt nu van node tot node. De plaatsen, aan de randen van het netwerk, waar de voertuigen aan het begin van de links verschijnen en aan het eind van de links verdwijnen, zijn zogehete "parkinglots". Deze dienen te worden aangelegd conform de VISSIM handleiding.

Samenstelling van het verkeer

Het verkeer dat in de praktijk over de rotonde rijdt is in hoofdstuk 4 verdeeld in drie soorten, te weten: personenauto's, ongelede vrachtwagens en gelede vrachtwagens. Om de werkelijkheid zo dicht mogelijk te benaderen wordt in VISSIM het aandeel van de verschillende soorten voertuigen gelijk gehouden aan de werkelijkheid. Hiertoe zijn in VISSIM de percentages personenauto's en vrachtwagens aangepast. Ook is de verscheidenheid aan vrachtwagens in het model verhoogd om onderscheid te maken tussen gelede en ongelede vrachtwagens.

Naast de samenstelling van het verkeer is ook de richtingsverdeling van het verkeer van belang. Voor de kalibratie moet dezelfde richtingsverdeling worden gebruikt als tijdens de praktijkmeting om eventuele fouten hierdoor te elimineren.

5.1.3 Kalibratie en validatie van het model

Om het rijgedrag zo realistisch mogelijk te kunnen simuleren moet het model worden gekalibreerd. Aangezien de verdelingen voor het kritisch hiaat, de volgtijd van het rotondeverkeer en de oprijvolgtijd van het toeritverkeer bekend zijn, zal het model zodanig worden gekalibreerd dat dit gedrag overeenkomt met de praktijk. Ter validatie worden de gesimuleerde rotonde-intensiteit en de daarbij behorende toeritcapaciteit vergeleken met de gemeten praktijkwaarden. Waarneer dit overeenkomt wordt het model betrouwbaar geacht. Een extra validatie is het toepassen van de gekalibreerde parameters op verschillende rotondes en het vergelijken van de uitkomsten met gemeten uitkomsten.
De modelresultaten, die nodig zijn voor de kalibratie, worden uit VISSIM gehaald door "data collection points" aan te brengen in het model. Deze data collection points kunnen worden gezien als telslangen en geven onder andere de passagetijden van de voor- en achterkant van de voertuigen. Op deze manier wordt een dataset verkregen met daarin dezelfde informatie als de dataset uit de praktijkmeting, mits de telslangen op dezelfde locatie zijn gelegd als de denkbeeldige lijnen bij de praktijkmeting.

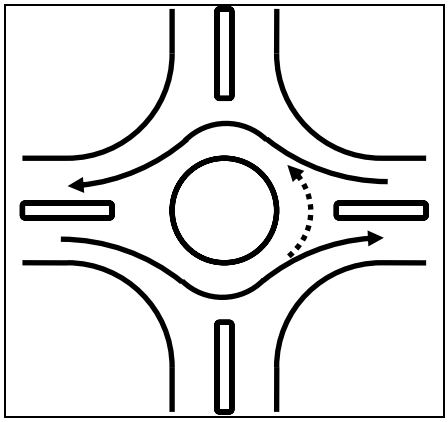
De VISSIM-instellingen die in aanmerking komen voor kalibratie zijn de volgende:
- Volgmodel waarmee het volggedrag van de voertuigen wordt beschreven;
- De instellingen van de voorrangsregels;
- De gewenste snelheid van het verkeer op de rotonde;
- Eventueel de curven voor de gewenste en maximale versnelling van de voertuigen.

Stap 1

De eerste stap in de kalibratie is het afstellen van de afritconnector, zodat het schijnconflict op de juiste manier in rekening wordt gebracht. Het schijnconflict, dat in de praktijk voornamelijk wordt veroorzaakt door afslaande voertuigen die hun richtingaanwijzer niet gebruiken, treedt ook op in VISSIM. Hier wacht een invoegend voertuig tot een voertuig op de rotonde de rotondelink verlaat en de afritconnector oprijdt. Wanneer een afritconnector eerder stroomopwaarts begint, zal het schijnconflict in VISSIM kleiner worden.

Het vinden van het juiste beginpunt van de afritconnector is gedaan door twee stromen verkeer in tegengestelde richting te laten rijden, zie Figuur 5-1. Hier zal het verkeer op de rechter toerit wachten tot zeker is of het verkeer, rijdend van links naar rechts, daadwerkelijk afslaat en niet de gestippelde lijn vervolgt. Wanneer de intensiteit van de stroom van rechts naar links vast wordt ingesteld op de maximale waarde, en de intensiteit van de andere stroom vanaf nul stapsgewijs wordt verhoogd, kan worden bepaald wat de invloed is van het afslaande verkeer op het oprijdende verkeer.

Door het beginpunt van de connector van de afrit stroomopwaarts te verschuiven wordt de invloed van het afslaande verkeer verminderd. Dit beginpunt is zodanig verschoven dat de invloed van het afslaande verkeer in het model gelijk is aan de invloed zoals gemeten in de praktijk.



Figuur 5-1: kalibratie schijnconflict

Stap 2

De tweede stap in de kalibratie is het kalibreren van het rijgedrag. Begonnen wordt met het afstellen van de oprijvolgtijdverdeling van het toeritverkeer en de volgtijdverdeling van het rotondeverkeer. Dit wordt gedaan door de parameters van het Wiedemann 74 model in VISSIM aan te passen. Dit volgmodel luidt als volgt:

$$d = ax + (bs\_add + bx\_mult \cdot z) \cdot \sqrt{v} \qquad (5.1)$$

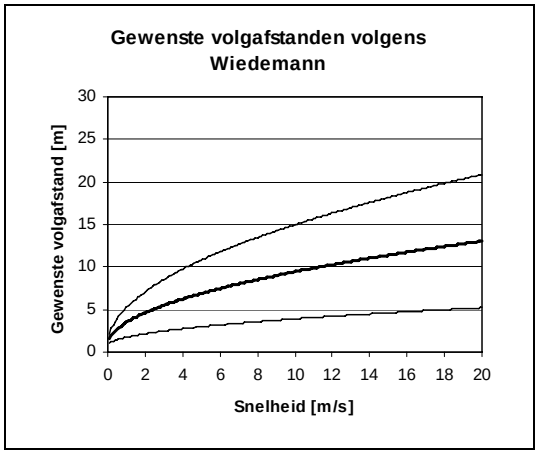
Hierin is:
d = Gewenste volgafstand van een voertuig [m]
ax = Gemiddelde gewenste afstand tussen stilstaande voertuigen [m]
bx_add = Vaste component van de gewenste veiligheidsafstand tussen rijdende voertuigen [m]
bx_mult= Variabele component van de gewenste veiligheidsafstand tussen rijdende voertuigen [m]
z = Waarde met een normaalverdeling rond 0,5 met een st. deviatie van 0,15, begrenst tot het interval [0,1].
v = Snelheid van het voertuig [m/s].

Figuur 5-2 geeft een grafische weergave van het model van Wiedemann.

Aangenomen wordt dat het rijgedrag op rotondes in een Nederlandse situatie agressiever is dan in de Duitse situatie. Aangezien VISSIM een Duits model is zullen de instellingen waarschijnlijk zodanig moeten worden aangepast, dat zowel de oprijvolgtijd als de volgtijd kleiner worden. Dit wordt gedaan door de parameters ax en bx_add te verlagen.

Bij de kalibratie wordt naar twee zaken gekeken: De piek van de verdeling moet op dezelfde plaats liggen en de spreiding van de verdeling moet overeenkomen met die van de gemeten verdeling. De spreiding wordt aangepast door de waarde bx_mult aan te passen.

Wanneer aanpassingen aan het volgmodel van Wiedemann niet voldoende blijken te zijn kunnen ook de curven voor de gewenste en maximale versnelling van de voertuigen worden aangepast. Dit is, in vergelijking tot het Wiedemann model, een vrij ingewikkelde aanpassing binnen VISSIM en wordt alleen gedaan indien dit strikt noodzakelijk is.



Figuur 5-2: volgmodel van Wiedemann

Stap 3

De derde stap in de kalibratie is het afstellen van het kritisch hiaat. Dit wordt gedaan aan de hand van de voorrangsregels in het model. Aan de voorrangsregels worden de volgende eisen gesteld:

- Het berekende kritisch hiaat, op dezelfde wijze berekend als voor de gemeten data, moet overeenkomen met het kritisch hiaat uit de praktijkmeting.
- Een voertuig moet bij het invoegen een realistische afstand hebben tot het voertuig waaraan voorrang is verleend, niet te groot en niet te klein.
- Een lang voertuig, bijvoorbeeld een vrachtauto, moet een groter hiaat kiezen dan een kort voertuig maar moet ook voorrang kunnen nemen zonder dat er aanrijdingen optreden.
- Zowel het rotondeverkeer als het toeritverkeer moet rekening houden met langzaam rijdend verkeer in de conflicterende stroom.

Validatie

Wanneer deze drie zaken zijn gekalibreerd, wordt het model gevalideerd door de gesimuleerde rotonde-intensiteit en toeritcapaciteit te vergelijken met de resultaten van de praktijkmeting. Wanneer deze overeenkomen zal het model als juist gekalibreerd worden beschouwd.

Een tweede validatie is het toepassen van dezelfde instellingen op andere rotondetypes. Aangenomen wordt dat het rijgedrag van een automobilist in de basis consistent is voor verschillende typen rotondes. Als deze aanname correct is, zullen de verschillen in de resultaten alleen worden verklaard door de verkeerssituatie en niet door het rijgedrag. Wanneer bij toepassing van dezelfde instellingen, aangaande schijnconflict en rijgedrag, resultaten volgen die vergelijkbaar zijn met resultaten uit de metingen, is aangetoond dat het rijgedrag consistent is en geldig op alle rotondes.

De resultaten van de kalibratie en validatie worden getoond in paragraaf 5.3.

5.2 Modellen

5.2.1 Enkelstrooks rotonde

Voor deze studie zijn drie enkelstrooksrotondes nagebouwd in VISSIM, te weten:

- Rotonde van Schipluiden;
- Rotonde van Bergschenhoek;
- Standaard enkelstrooksrotonde.

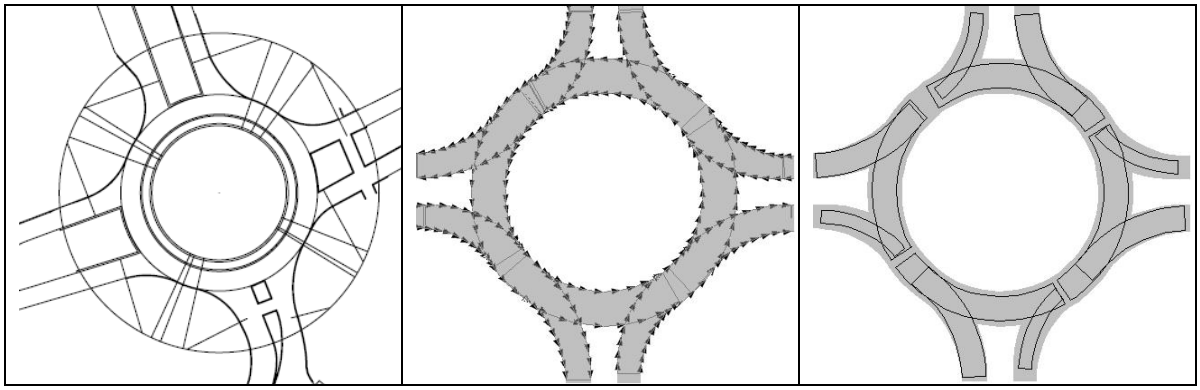
Er is gekozen voor deze rotondes omdat er van Schipluiden en Bergschenhoek betrouwbare meetgegevens beschikbaar zijn waarmee het model gekalibreerd kan worden. Deze rotondes hebben verschillende diameters en verschillende breedten van de middengeleiders, waardoor de invloed hiervan onderzocht kan worden. Wanneer de modelresultaten van de twee rotondes met dezelfde instellingen overeenkomen met de gemeten resultaten, wordt aangenomen dat deze instellingen ook gelden voor de standaard enkelstrooksrotonde.
De standaard enkelstrooksrotonde zal worden gebruikt voor het onderzoek.

De in deze paragraaf getoonde waarden voor de instellingen zijn het resultaat van de kalibratie en gelden voor alle enkelstrooksrotondes. Voor een overzicht van de kalibratie resultaten wordt verwezen naar paragraaf 5.3.

De links en connectors worden gelegd zoals beschreven in paragraaf 5.1.2. Hiervoor wordt een figuur gebruikt zoals getoond in de linker afbeelding van Figuur 5-3. Hierin worden, door middel van lijnen, de tangentpunten met de eventuele verschuivingen aangegeven.

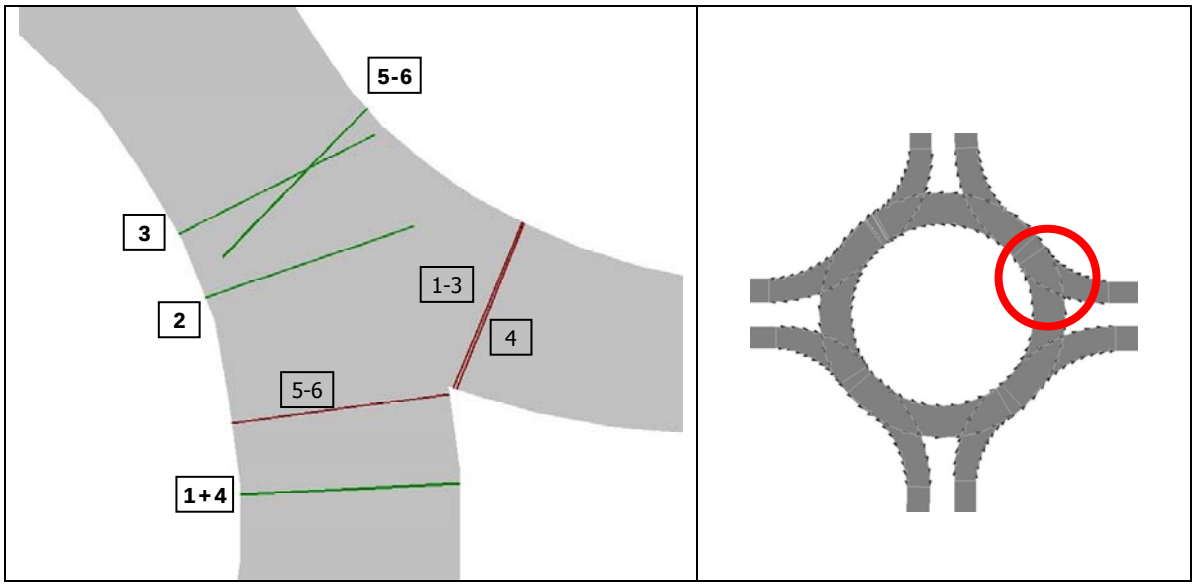
Na het leggen van de links en connectors ziet het model er uit als getoond in het middelste plaatje van Figuur 5-3. De links hebben een breedte conform de werkelijke breedte.

Het rechter figuur toont de locatie van de zones met een gereduceerde gewenste maximumsnelheid. Op de gehele rotonde geldt een maximumsnelheid van 25 km/h voor personen auto's en 20 km/h voor vrachtauto's. Voor Bergschenhoek liggen de snelheden 5 km/h hoger.



Figuur 5-3: links: voorbeeld ondergrond rotonde, midden: overzicht links en connectors, rechts: reduced speed areas

De lijnen van de verkeersregels moeten zodanig neergelegd worden dat het rotondeverkeer geen voorrang verleent aan het verkeer dat voor de stopstreep op de toerit staat te wachten en dat het toeritverkeer wel voorrang verleent aan het rotondeverkeer dat eventueel voor de stopstreep op de rotonde staat te wachten. De locatie van de groene lijnen 1 en 4 moet zodanig zijn dat het toeritverkeer relatief dicht achter het rotondeverkeer invoegt.
De voorrangsregels zijn gelegd zoals getoond in Figuur 5-4.



Figuur 5-4: ligging voorrangsregels

Tabel 5-1 toont de instellingen die horen bij de diverse voorrangsregels. De kolomtitels zijn gelijk gehouden aan de in VISSIM gebruikte termen.

Tabel 5-1: Instellingen voorrangsregels

voorrangsregel	min. gap time [s]	min. headway [m]	max. speed [km/h]	red	green
1	2,5	0	180[12]	Alle	Alle
2	0	5	14	Alle	Alle
3	0	5	180	Alle	Alleen vrachtverkeer
4	3,0	0	180	Alleen vrachtverkeer	Alle
5	0	5	14	Alle	Alle
6	0	5	180	Alle	Alleen vrachtverkeer

De gebruikte parameters voor het volgmodel van Wiedemann zin weergegeven in Tabel 5-2.

Tabel 5-2: Parameters voor model van Wiedemann

ax	0,75
bx_add	0,75
bx_mult	4,00

[12] De waarde van 180 geeft aan dat deze regel geldt voor iedere snelheid.

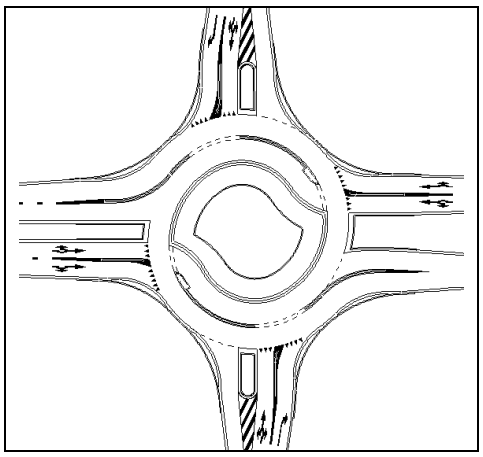
5.2.2 Turborotonde

Voor deze studie zijn twee turborotondes nagebouwd in VISSIM, te weten:

- Turborotonde van Rotterdam;
- Standaard turborotonde.

Er zijn data beschikbaar van praktijkmetingen op twee verschillende turborotondes, Rotterdam en Reeuwijk. Dit heeft data opgeleverd van twee verschillende soorten toeritten. De meting in Rotterdam vond plaats op een toerit conform de zuidelijke (en noordelijke) toerit van de turborotonde in Figuur 5-5. De meting in Reeuwijk vond plaats op een toerit conform de oostelijke (en westelijke) toerit.
De rotonde te Reeuwijk is een drietaks rotonde en de rotonde te Rotterdam een viertaks, waarbij de westelijke tak nauwelijks wordt gebruikt. In theorie zouden deze twee rotondes dus qua vormgeving nagenoeg gelijkwaardig zijn. Hierdoor is besloten om zowel de turborotonde van Rotterdam als die van Reeuwijk te modelleren als twee verschillende toeritten van één rotonde. Als voorbeeld is de Rotonde van Rotterdam gebruikt, omdat van deze rotonde capaciteitswaarden beschikbaar zijn die kunnen dienen ter validatie. De instellingen aangaande rijgedrag en voorrangsregels worden gelijk gehouden voor de twee verschillende toeritten.

Na validatie zal verder onderzoek worden gedaan met de standaard turborotonde met toepassing van de gekalibreerde instellingen.



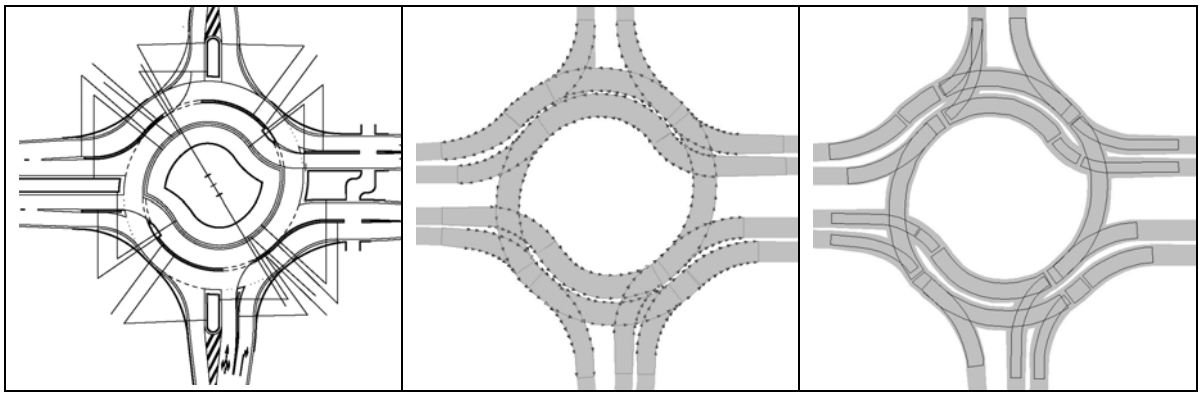
Figuur 5-5: overzicht turborotonde

De in deze paragraaf getoonde waarden voor de instellingen zijn het resultaat van de kalibratie en gelden voor alle turborotondes. Voor een overzicht van de kalibratie resultaten, zie paragraaf 5.3.

De links en connectors worden gelegd zoals beschreven in paragraaf 5.1.2. Hiervoor wordt een figuur gebruikt zoals getoond in de linker afbeelding van Figuur 5-6. Hierin worden, door middel van lijnen, de tangentpunten met de eventuele verschuivingen aangegeven.

Na het leggen van de links en connectors ziet het model er uit als getoond in het middelste figuur van Figuur 5-6. De links hebben een breedte conform de werkelijke breedte.
Het rechter figuur toont de locatie van de zones met een gereduceerde gewenste maximumsnelheid. Op de gehele rotonde geldt een maximumsnelheid van 35 km/h voor personen auto's en 30 km/h voor vrachtauto's. Aangenomen wordt dat de snelheid op een turborotonde ongeveer 5 km/h hoger ligt dan op een enkelstrooksrotonde.

De voorrangsregels zijn aangebracht volgens dezelfde filosofie als bij de enkelstrooksrotonde. Achtereenvolgens worden de voorrangsregels op de twee verschillende toerit-typen behandeld. Eerst volgt een overzicht van de, eenvoudige, toerit in combinatie met één rotondestrook, daarna volgt een overzicht van de, ingewikkelde, toerit in combinatie met twee rotondestroken. De gebruikte parameters voor het volgmodel van Wiedemann zijn weergegeven in de Tabel 5-3.

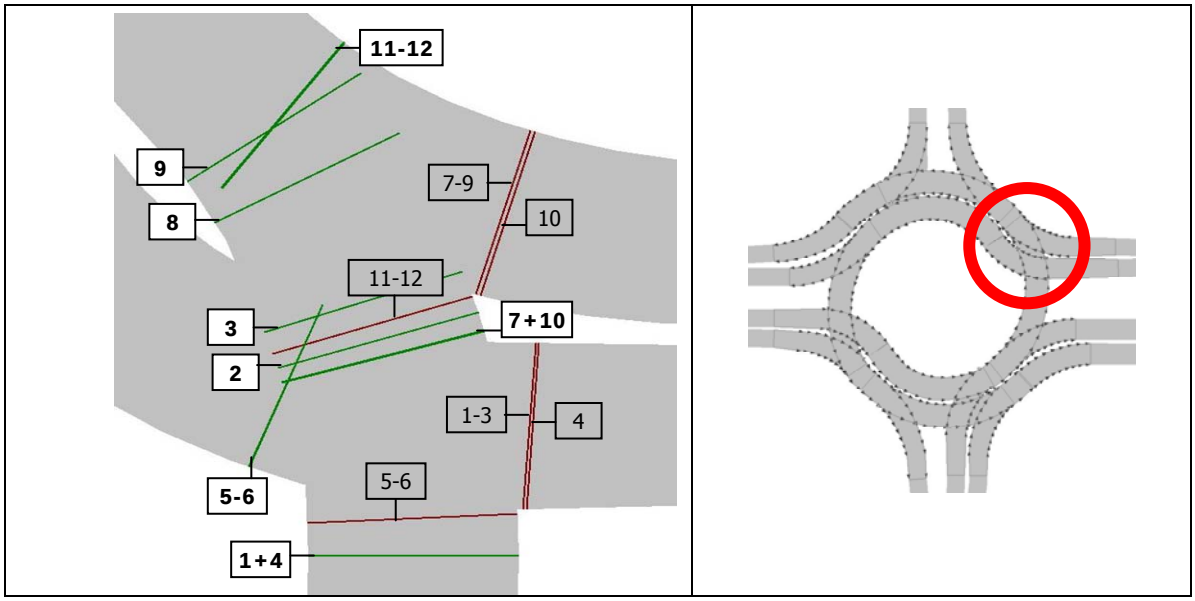


Figuur 5-6: voorbeeld ondergrond rotonde, midden: overzicht links en connectors, rechts: reduced speed areas

Tabel 5-3: Parameters voor model van Wiedemann	
ax	0,75
bx_add	0,75
bx_mult	4,00

Toerit met één rotondestrook

De toerit in combinatie met één rotondestrook kan worden gezien als twee enkelstrookstoeritten achter elkaar. De voorrangsregels zijn voor zowel de eerste als de tweede toerit identiek.
De voorrangsregels zijn gelegd zoals getoond in Figuur 5-7. De instellingen die horen bij de voorrangsregels zijn weergegeven in Tabel 5-4.



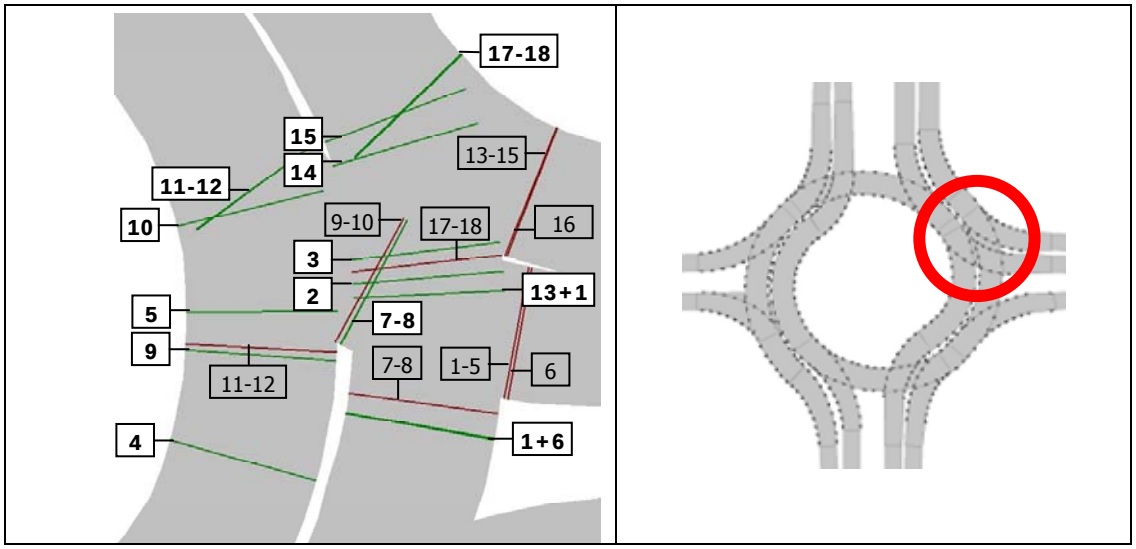
Figuur 5-7: ligging voorrangsregels

Tabel 5-4: Instellingen voorrangsregels

Voorrangsregel Nr.	min. gap time [s]	min. headway [m]	max. speed [km/h]	red	green
1	2,5	0	180	Alle	Alle
2	0	5	14	Alle	Alle
3	0	5	180	Alle	Alleen vrachtverkeer
4	3,0	0	180	Alleen vrachtverkeer	Alle
5	0	5	14	Alle	Alle
6	0	5	180	Alle	Alleen vrachtverkeer
7	2,5	0	180	Alle	Alle
8	0	5	14	Alle	Alle
9	0	5	180	Alle	Alleen vrachtverkeer
10	3,0	0	180	Alleen vrachtverkeer	Alle
11	0	5	14	Alle	Alle
12	0	5	180	Alle	Alleen vrachtverkeer

Toerit met twee rotondestroken

De toerit in combinatie met twee rotondestroken is ingewikkelder dan de toerit met één rotondestrook omdat het verkeer op de linker toerit voorrang moet geven aan zowel verkeer op de binnenste als op de buitenste rotondestrook. Daarnaast is uit het onderzoek voor het analytische model gebleken dat het kritisch hiaat op de binnenste rijstrook verschilt van het kritisch hiaat op de buitenste rijstrook. Dit wordt in het model meegenomen door afwijkende voorrangsregels te hanteren. Voor de rechter toeritstrook gelden wel de voorrangsregels zoals die gelden bij de enkelstrooksrotonde.
De voorrangsregels zijn gelegd zoals getoond in Figuur 5-8. De instellingen die horen bij de voorrangsregels zijn weergegeven in Tabel 5-5.



Figuur 5-8: ligging voorrangsregels

Tabel 5-5: Instellingen voorrangsregels

voorrangsregel	min. gap time [s]	min. headway [m]	max. speed [km/h]	red	green
1	2,5	0	180	Alle	Alle
2	0	5	14	Alle	Alle
3	0	5	180	Alle	Alleen vrachtverkeer
4	2,5	0	180	Alle	Alle
5	0	5	14	Alle	Alle
6	3,0	0	180	Alleen vrachtverkeer	Alle
7	0	5	14	Alle	Alle
8	0	5	180	Alle	Alleen vrachtverkeer
9	1,8	0	180	Alle	Alle
10	0	5	14	Alle	Alle
11	0	5	14	Alle	Alle
12	0	5	180	Alle	Alleen vrachtverkeer
13	2,5	0	180	Alle	Alle
14	0	5	14	Alle	Alle
15	0	5	180	Alle	Alleen vrachtverkeer
16	3,0	0	180	Alleen vrachtverkeer	Alle
17	0	5	14	Alle	Alle
18	0	5	180	Alle	Alleen vrachtverkeer

5.3 Kalibratie en Validatie

In deze paragraaf worden de resultaten van de kalibratie behandeld. De kalibratie van het model bestaat, zoals beschreven in paragraaf 5.1.3, uit drie verschillende stappen:

- Juist in rekening brengen van het schijnconflict;
- Aanpassen van het volgmodel zodat dat de verdelingen van de volgtijd en de oprijvolgtijd overeenkomen met de werkelijkheid;
- Instellen en verschuiven van de voorrangsregels zodat het kritisch hiaat overeenkomt met de werkelijkheid.

Na de kalibratie volgt de validatie door de gesimuleerde intensiteiten en capaciteiten te vergelijken met de werkelijke intensiteiten en capaciteiten.
De kalibratie is eerst gedaan voor de enkelstrooksrotonde van Schipluiden. Nadat dit model is gekalibreerd en gevalideerd wordt onderzocht of, met de gevonden set parameters, de resultaten op de andere rotondetypen ook overeenkomen met de werkelijkheid.

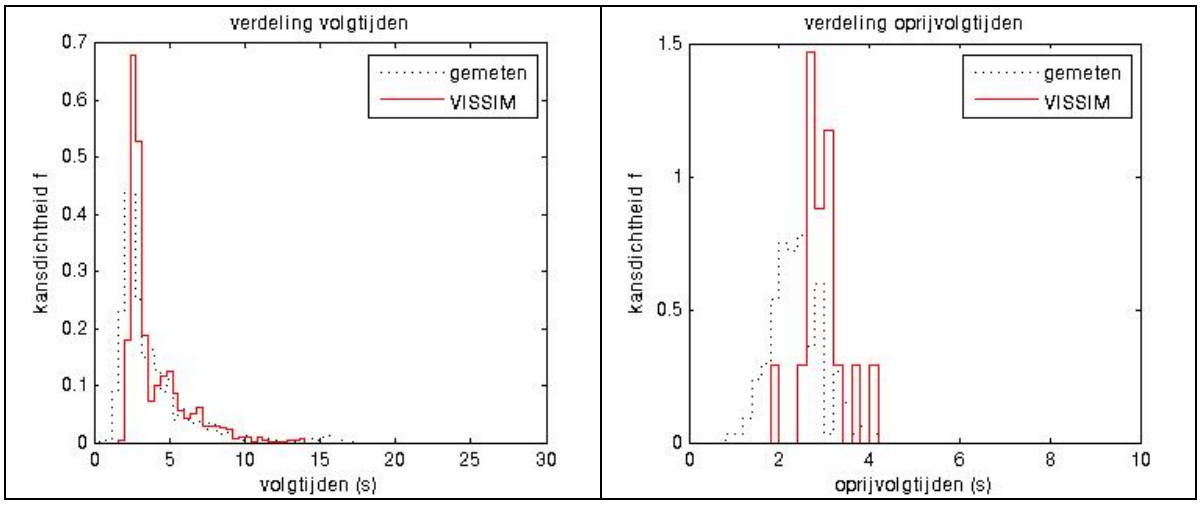
In deze paragraaf zullen alleen de beginsituatie en de eindresultaten worden behandeld. Een gedetailleerdere beschrijving van de doorlopen stappen is te vinden in Bijlage C.

5.3.1 Schijnconflict

Zoals beschreven in paragraaf 5.1.3 wordt het schijnconflict gekalibreerd door twee verkeersstromen in tegenovergestelde richting over de rotonde te laten rijden. Uit deze kalibratie is gebleken dat wanneer het beginpunt van de connector, op het tangentpunt van de boog, met 3,70 meter stroomopwaarts wordt verschoven, de invloed van het schijnconflict overeenkomt met de resultaten van de studie naar het analytisch model.
Deze kalibratie is in eerste instantie uitgevoerd voor de enkelstrooksrotonde van Schipluiden. Vervolgens is de verschuiving van 3,70 meter ook toegepast op de enkelstrooksrotonde van Bergschenhoek en op de standaard enkelstrooksrotonde. Ook bij deze rotondes bleken de resultaten overeen te komen met de resultaten uit de studie naar het analytisch model.

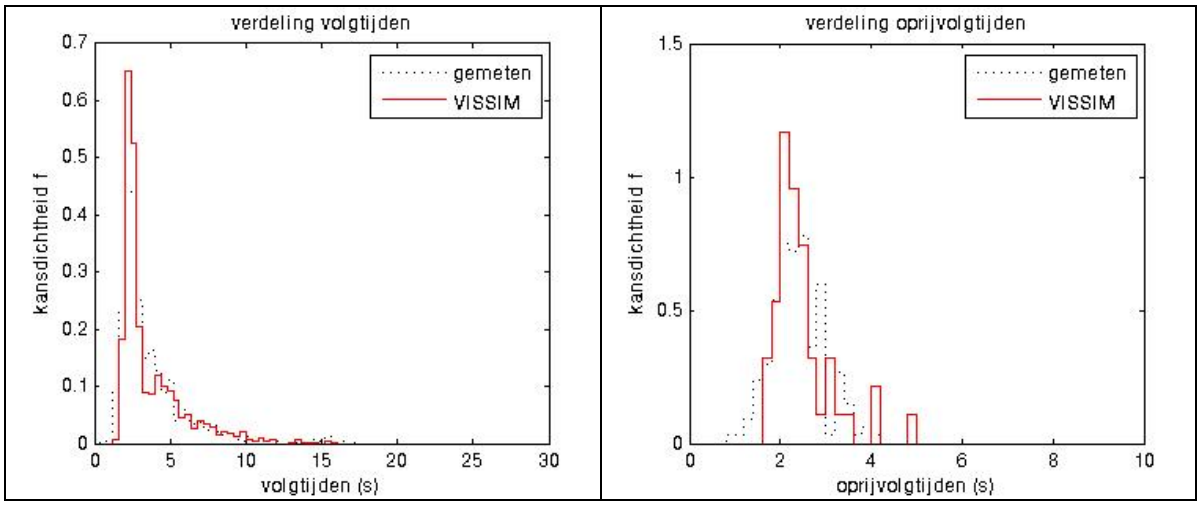
5.3.2 Volgtijdverdeling en oprijvolgtijdverdeling

De verdelingen van de volgtijden en de oprijvolgtijden, zoals die gegenereerd worden door VISSIM bij toepassing van de standaard instellingen voor het volgmodel van Wiedemann, zijn weergegeven in Figuur 5-9. Te zien is dat de verdelingen uit VISSIM teveel naar rechts liggen en te weinig spreiding laten zien. De instellingen in VISSIM moeten dus zodanig worden aangepast dat de voertuigen dichter op elkaar gaan rijden, dichter achter elkaar beginnen met optrekken en grotere verschillen vertonen in rijgedrag.



Figuur 5-9: oprijvolgtijd- en volgtijdverdeling bij standaard VISSIM instellingen

De aanpassing is gedaan door nieuwe waarden aan te nemen voor het volgmodel van Wiedemann. Deze kalibratie leverde na tien iteraties de verdelingen op zoals die zijn getoond in Figuur 5-10. Per iteratie is slechts één van de drie parameters veranderd om zodoende goed te zien wat de invloed is van de desbetreffende parameter op de verdelingen. Uit de figuren blijkt dat de verdelingen goed op elkaar liggen. De statistische gegevens die horen bij deze verdelingen zijn weergegeven in Tabel 5-6 en de instellingen voor het model van Wiedemann in Tabel 5-7.



Figuur 5-10: oprijvolgtijd- en volgtijdverdeling na kalibratie.

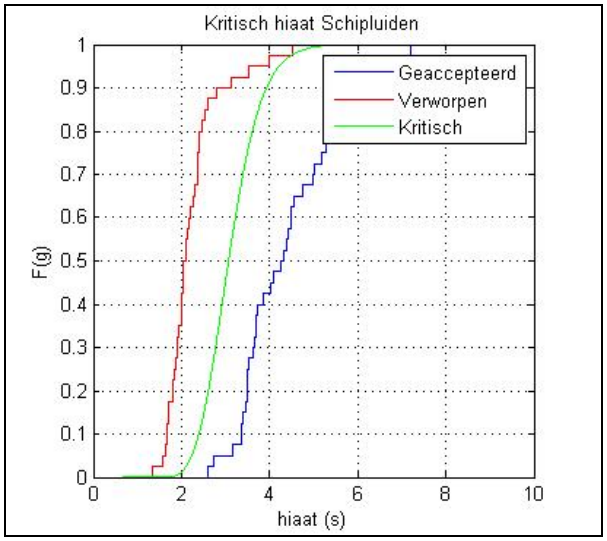
Tabel 5-6: Statistische gegevens van de (oprij)volgtijd verdelingen na kalibratie

	Oprijvolgtijd [s]		**Volgtijd [s]**		
	Mediaan	St. deviatie		t_M	St. deviatie
Gemeten	2,10	0,662	Gemeten	2,15	0,493
VISSIM	2,15	0,637	VISSIM	2,11	0,316

Tabel 5-7: Parameters voor model van Wiedemann	
ax	0,75
bx_add	0,75
bx_mult	4,00

5.3.3 Kritisch hiaat

Het kritisch hiaat wordt gekalibreerd door middel van aanpassingen aan de voorrangsregels. In eerste instantie zijn de voorrangsregels overgenomen die zijn genoemd in de VISSIM handleiding. Na de eerste run is gebleken dat de door VISSIM aanbevolen instellingen redelijke resultaten geven. Het hiaat van voorrangsregel 1 is met 0,1s verminderd om het kritisch hiaat iets kleiner te maken. Dit resulteert in de kritisch hiaat verdeling zoals getoond in Figuur 5-11. De statistische gegevens van de verdelingen zijn opgenomen in Tabel 5-8. Uit de statistische gegevens blijkt dat het model resultaten geeft die overeenkomen met de gemeten resultaten.



Figuur 5-11: kritisch hiaat verdeling uit VISSIM

Tabel 5-8: Kritisch hiaat

	Gemiddelde	St. deviatie
Gemeten	3,14	0,271
VISSIM	3,13	0,373

5.3.4 Validatie van het model

Zoals vermeld in paragraaf 5.1.3 is het model op twee manieren gevalideerd. De eerste validatie is gedaan door de toeritcapaciteit van het model te vergelijken met de capaciteit zoals die is gemeten. Wanneer deze capaciteiten overeenkomen geeft het model een realistisch beeld van de werkelijkheid.

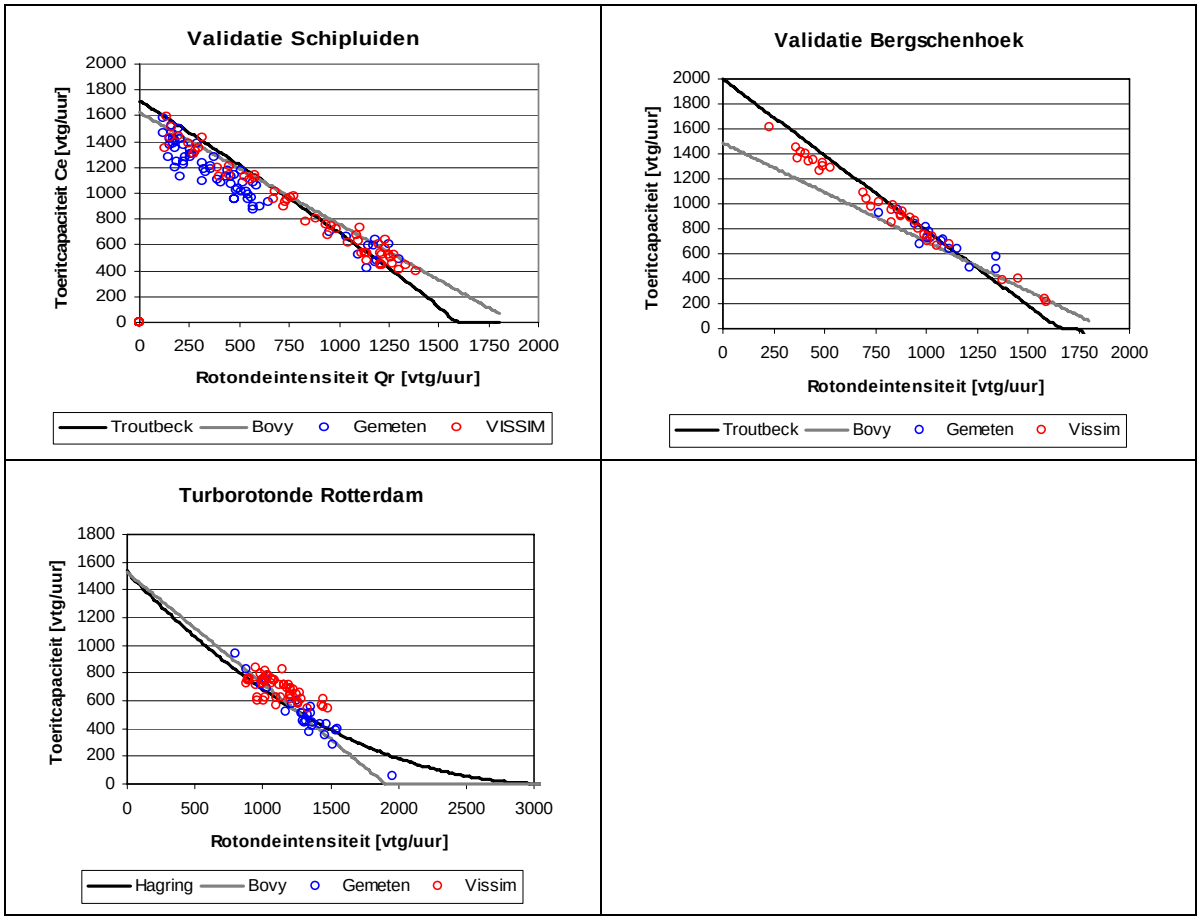
De tweede validatie is het toepassen van dezelfde instellingen op andere rotondetypes. Wanneer de capaciteiten van deze verschillende rotondemodellen overeenkomen met de gemeten capaciteiten van de gemodelleerde rotondes, zullen de instellingen geldig worden geacht voor alle rotondetypes.

De eindresultaten van beide validaties zijn getoond in Figuur 5-12. Voor een gedetailleerdere beschrijving van de validatie wordt verwezen naar Bijlage C. In deze bijlage wordt ook de vergelijking van de verdelingen voor oprijvolgtijden, volgtijden en kritisch hiaten weergegeven.

Uit de resultaten van de validatie blijkt dat de gesimuleerde capaciteiten van de beschouwde toeritten vergelijkbaar zijn met de gemeten capaciteiten. Dit betekent dat de modelinstellingen die zijn gevonden voor Schipluiden ook geldig zijn voor de rotondes van Bergschenhoek en Rotterdam.

Uit de resultaten blijkt verder dat het simulatie programma VISSIM geschikt is voor het simuleren van het rijgedrag op (turbo)rotondes.

Nu het model gekalibreerd en gevalideerd is, kan dit gebruikt worden voor verder onderzoek.



Figuur 5-12: Validatieresultaten: vergelijking gemeten – gesimuleerde toeritcapaciteiten

5.4 Te onderzoeken onderwerpen

Uit paragraaf 5.3.4 is gebleken dat het VISSIM model geschikt is voor veder onderzoek naar het rijgedrag van automobilisten op rotondes. In deze paragraaf wordt beschreven welke punten worden onderzocht. De resultaten van het onderzoek naar deze punten worden beschreven in Paragraaf 5.5.

Tijdens de kalibratie bleek het volgende punt nader onderzoek te vragen:
- De oorzaak van verschillende kritisch hiaten op de verschillende rotondestroken van de turborotonde Rotterdam en het verschil in kritisch hiaat tussen de turborotonde en enkelstrooksrotonde bij toepassing van dezelfde voorrangsregels.

Gedurende het onderzoek naar het analytisch model zijn de volgende punten naar voren gekomen die nader onderzocht moeten worden:
- Het functioneren van de rotonde onder extreme belastingen;
- De invloed van de verdeling van het rotondeverkeer over de twee rotondestroken van een turborotonde op de toeritcapaciteit.
- De relatie tussen de rotonde-intensiteit en het percentage vrij rijdend verkeer.

Nadat deze punten zijn onderzocht wordt verondersteld dat het rijgedrag op de rotonde voldoende begrepen wordt om de volgende algemene punten te onderzoeken:
- Invloed van snelheid op de rotonde op rijgedrag en de capaciteit;
- Invloed van rotondediameter op rijgedrag en de capaciteit;
- Invloed van richtingsverdeling van het verkeer op de capaciteit;
- Verhouding volgtijdverdeling / hiaatverdeling bij verschillende snelheden;

Afsluitend zal er een evaluatie plaatsvinden waarin wordt gecontroleerd of de gevonden parameters voor het analytisch model juist zijn. Indien dit niet het geval is zullen nieuwe waarden voor deze parameters worden bepaald.

5.4.1 Oorzaak van het waarnemen van verschillende kritisch hiaten

Tijdens de kalibratie is gebleken dat de gevonden instelling voor het kritisch hiaat op een enkelstrooksrotonde ook juiste resultaten geeft bij toepassing op een turborotonde, mits dezelfde verdeling van het verkeer op de twee rotondestroken wordt aangehouden, zoals die zich voordeed gedurende de praktijkmeting. Hierbij valt op dat wanneer in VISSIM gelijke kritisch hiaten worden ingesteld voor zowel de binnenste als de buitenste rotondestrook, de berekende kritisch hiaten voor de verschillende rotondestroken van elkaar afwijken. Dit komt overeen met de resultaten van de praktijkwaarnemingen.
Een mogelijke verklaring voor dit voorval is de ongelijke verdeling van het verkeer over de twee rotondestroken, zoals dat optrad tijdens de praktijkmeting in Rotterdam. Dit zou een negatieve invloed kunnen hebben op het onderscheiden van hiaten op de binnenste en de buitenste rotondestrook, waardoor het berekende kritisch hiaat een afwijkende waarde aanneemt.
Een andere verklaring kan zijn het verschil in snelheid op de beide rotondestroken. De snelheid op de buitenste rotondestrook ligt 5 km/h hoger dan op de binnenste rotondestrook. Dit zou tevens kunnen verklaren waarom het kritisch hiaat op de buitenste rotondestrook afwijkt van de enkelstrooksrotonde en het kritisch hiaat op de binnenste rotondestrook hiermee overeenkomt.
Een derde verklaring kan het verschil in oprijlengte zijn. Een wachtend voertuig op de toerit moet vanuit stilstand de buitenste rotondestroom kruisen en, na een aantal meter gereden te hebben, met enige snelheid invoegen in de binnenste rotondestroom.

Samengevat levert dit de volgende concrete onderzoekspunten op:
- Invloed van de verdeling van het verkeer over de rotondestroken op het kritisch hiaat;
- Invloed van de snelheid op de rotonde op het kritisch hiaat;
- Invloed van de oprijlengte op het kritisch hiaat.

5.4.2 Het functioneren van de rotonde onder extreme belastingen

Tijdens het verwerken van de data uit de praktijkwaarnemingen is, voor enkele rotondes, gebleken dat de metingen te weinig data hebben opgeleverd om het volledige bereik van de rotonde-intensiteit te beschrijven. Het model kan worden gebruikt om deze gaten op te vullen. Hiermee wordt onderzocht welk analytisch model de toeritcapaciteiten het meest nauwkeurig berekent bij extreem weinig en extreem veel rotondeverkeer.

5.4.3 Invloed van verdeling van het rotondeverkeer over twee rotondestroken

Wanneer al het rotondeverkeer gezamenlijk over één rotondestrook rijdt, zal dit een lagere toeritcapaciteit opleveren dan wanneer dit verkeer zich verdeelt over twee rotondestroken. Bij een verdeling van het rotondeverkeer treden er meer grote hiaten op dan wanneer al het verkeer over één strook rijdt. Hoe groot deze invloed is moet nader worden onderzocht.
Deze invloed wordt in de formule van Bovy beschreven door de parameters b_{licht} en b_{zwaar}. Deze waarden konden, door een gebrek aan data, niet worden bepaald aan de hand van de praktijkwaarnemingen. Uit dit onderzoek moet blijken wat de juiste waarden voor deze parameters zijn.
In de formules van Hagring en Fisk wordt deze invloed in rekening gebracht door de volgtijdverdelingen op de verschillende rotondestromen. In deze formules is het mogelijk om verschillende kritische hiaten toe te schrijven aan de verschillende rotondestroken. Hierdoor wordt de invloed van een ongelijke verkeersverdeling verschillend in rekening gebracht voor de verschillende rotondestroken, met andere woorden: een verkeersverdeling van 40-60 tussen de twee rotondestroken heeft een andere invloed dan een verdeling van 60-40. Wanneer de gevonden kritische hiaten juist zijn, zullen de formules de juiste toeritcapaciteiten berekenen voor verschillende verkeersverdelingen.

5.4.4 Relatie tussen rotonde-intensiteit en percentage vrij rijdend verkeer

Uit het onderzoek naar de analytische modellen is gebleken dat er te weinig data voorhanden is om de relatie tussen de rotonde-intensiteit en het percentage vrije voertuigen nauwkeurig te kunnen bepalen. Deze relatie wordt toegepast in de formules van Troutbeck en Hagring. Het model kan worden gebruikt om meer data te genereren waardoor de relatie beter kan worden onderzocht.

5.4.5 Invloed van snelheid op de capaciteit

De snelheid op de rotonde is afhankelijk van de rijcurven van de voertuigen. De rijcurven worden bepaald door de boogstralen en de rijstrook breedtes, en de boogstralen worden bepaald door de rotondediameter. Wanneer de snelheid op de rotonde toeneemt zal het volggedrag en het hiaatacceptatiegedrag veranderen.
Het volggedrag verandert omdat de voertuigen in de rotondestroom bij hogere snelheid een groter gat tot hun voorganger aanhouden. Dit leidt tot een lagere dichtheid van de rotondestroom. Wanneer het kritisch hiaat gelijk blijft zal dit de capaciteit verhogen. De vraag is echter of het kritisch hiaat gelijk blijft bij toename van de rotondesnelheid. Waarschijnlijk zal een bestuurder voorzichtiger worden met invoegen naarmate de snelheid op de rotonde hoger wordt, waardoor netto kritisch hiaat toeneemt. Door dit gedrag zal de capaciteit tot een bepaalde snelheid toenemen en daarboven afnemen.

5.4.6 Invloed van de rotondediameter op de capaciteit

De Leeuw [16] stelt in zijn afstudeerrapport dat de invloed van de rotondediameter op de capaciteit marginaal is. De invloed op de capaciteit is echter wel substantieel bij "extreme" diameters. Een zeer kleine diameter zorgt er voor dat het verkeer op de toerit niet alleen rekening moet houden met het rotondeverkeer maar ook met het verkeer dat zich op de bovenstrooms gelegen toerit bevindt. Dit veroorzaakt een grotere oprijvolgtijd en dus een lagere toeritcapaciteit. Wanneer een rotondediameter zeer groot wordt, zal de afstand tussen de rotondetakken ook groter worden. Bij een te grote afstand tussen de rotondetakken heeft de rotondestroom tijd zich te herschikken, nadat er een hiaat wordt veroorzaakt door een afslaand voertuig. Hierdoor is het hiaat mogelijk niet bruikbaar meer. Volgens De Leeuw wordt de optimale rotondediameter bepaald door het kritisch hiaat en de snelheid op de rotonde. Bij een snelheid van 34 km/h en een kritisch hiaat van 3,5 seconde is de optimale binnendiameter 43 m. Voor een kritisch hiaat van 3,0 seconde is dit 38 m.
Een ander effect van een grotere diameter van een rotonde is de vermindering van het schijnconflict. Bij een grotere rotondediameter is het mogelijk de middengeleider breder te maken waardoor het verkeer op de toerit eerder ziet of een voertuig uit de rotondestroom wel of niet afslaat. Wanneer de middengeleider te groot wordt, zal de capaciteit weer afnemen vanwege het herschikken van de rotondestroom.
Uit onderzoek moet blijken wat de optimale maten zijn voor de rotondediameter en de breedte van de middengeleider.

5.4.7 Invloed van richtingsverdeling op de capaciteit

De richtingsverdeling van het verkeer op de rotonde bepaalt voor een groot deel de samenstelling van de rotondestroom. Om dit te verduidelijken wordt gebruik gemaakt van een aantal voorbeelden. De voorbeelden zijn grafisch weergegeven in Figuur 5-13.

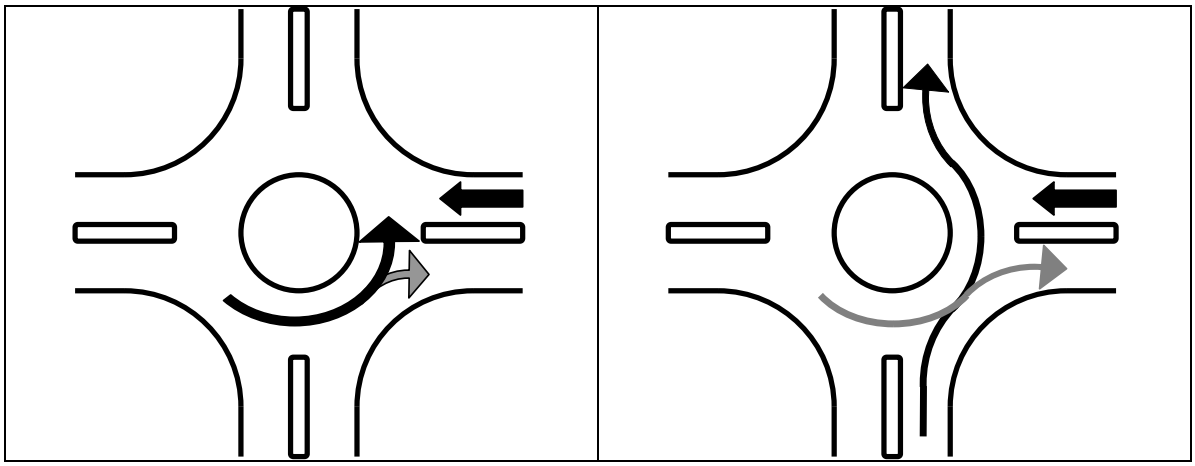
Voorbeeld 1

Het verkeer op de oostelijke toerit van de rotonde staat te wachten tot er een hiaat optreedt in de rotondestroom. Wanneer de intensiteit van de stroom hoog wordt, zullen de enige optredende hiaten worden gecreëerd door de afslaande stroom.

Voorbeeld 2

De rotonde heeft een sterke hoofdstroom van het zuiden naar het noorden en twee kleinere stromen van oost naar west en van west naar oost. Wanneer de intensiteit van de hoofdstroom hoog wordt, zullen de enige optredende hiaten worden gecreëerd door de stroom van west naar oost waaraan de hoofdstroom voorrang moet verlenen.

Door het creëren van hiaten door afslaand en kruisend verkeer wordt de samenstelling van de rotondestroom beïnvloed. Met andere woorden: de richtingsverdeling is van invloed op het percentage vrij verkeer in de rotondestroom.
Er moet worden onderzocht in welke mate het percentage vrije voertuigen in de rotondestroom wordt beïnvloed door de richtingsverdeling, en wat de invloed is van het percentage vrije voertuigen op de capaciteit, bij een onveranderde rotonde-intensiteit.



Figuur 5-13: Simulatieopzet voor bepalen van de invloed van richtingsverdeling op de capaciteit.
Links: voorbeeld 1, Rechts: voorbeeld 2

5.4.8 Evaluatie van de modelparameters van het analytisch model

Als afsluiting van het onderzoek worden de waarden, van de gevonden parameters uit de studie naar het analytisch model, geëvalueerd aan de hand van de resultaten van de studie met het simulatiemodel. Indien deze waarden niet juist blijken te zijn, zullen de parameters opnieuw worden bepaald. Dit wordt voor de parameters van het verkeersstroommodel gedaan door een gezamenlijke schatting. De parameters voor de hiaatacceptatiemodellen worden bepaald door een afzonderlijke schatting.

5.5 Onderzoeksresultaten

In deze paragraaf worden de resultaten behandeld van de onderzochte punten die zijn beschreven in paragraaf 5.4. De resultaten zullen slechts op hoofdlijnen worden behandeld. Voor een gedetailleerdere beschrijving van de onderzoeksresultaten wordt verwezen naar Bijlage D.

5.5.1 Oorzaak van het waarnemen van verschillende kritisch hiaten

Er zijn drie verschillende oorzaken van het waarnemen van verschillende kritisch hiaten onderzocht, te weten:

- Invloed van de verdeling van het verkeer over de rotondestroken op het kritisch hiaat;
- Invloed van de snelheid op de rotonde op het kritisch hiaat;
- Invloed van de oprijlengte op het kritisch hiaat.

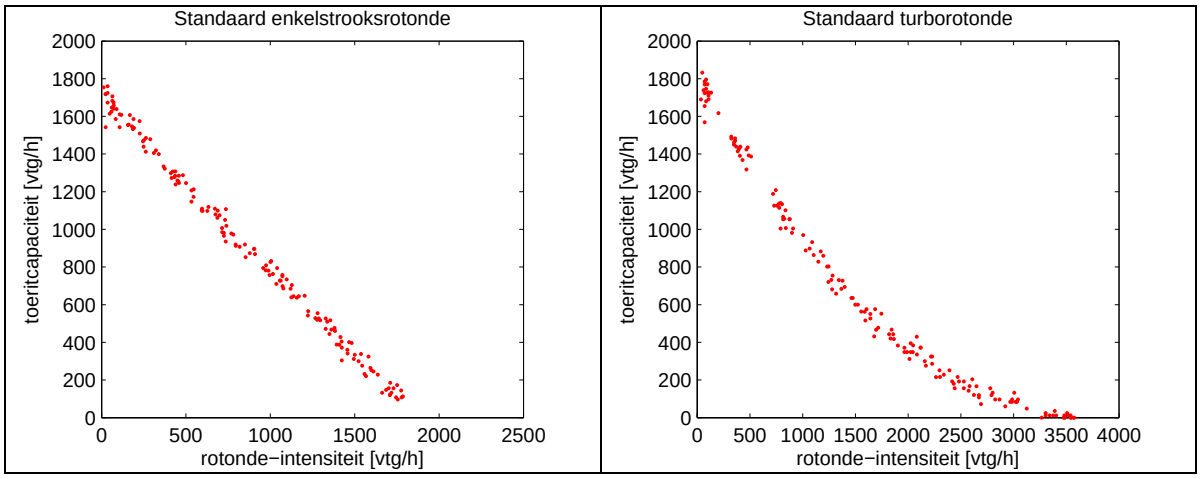
Uit het onderzoek, zie Bijlage D, is gebleken dat alleen de verdeling van het verkeer over de twee rotondestroken van de turborotonde een noemenswaardige invloed heeft. De snelheid en oprijlengte bleken het optreden van verschillende kritisch hiaten niet te verklaren.
De invloed van de verdeling over de rotondestroken is getoond in Tabel 5-9. Te zien is dat het kritisch hiaat voor de buitenste rijstrook groter wordt naarmate er in verhouding meer verkeer op de binnenste rijstrook gaat rijden. Dit is waarschijnlijk de oorzaak van het verschil in de kritisch hiaten die zijn berekend uit de praktijkwaarnemingen.

Tabel 5-9: invloed verkeersverdeling

Q_R=2400 vtg/h		
verdeling [%] binnen - buiten	t_{C_binnen}	t_{C_buiten}
10-90	-	2,8
30-70	2,7	2,8
50-50	3,2	2,9
70-30	3,1	3,3
90-10	3,1	4,2

5.5.2 Het functioneren van de rotonde onder extreme belastingen

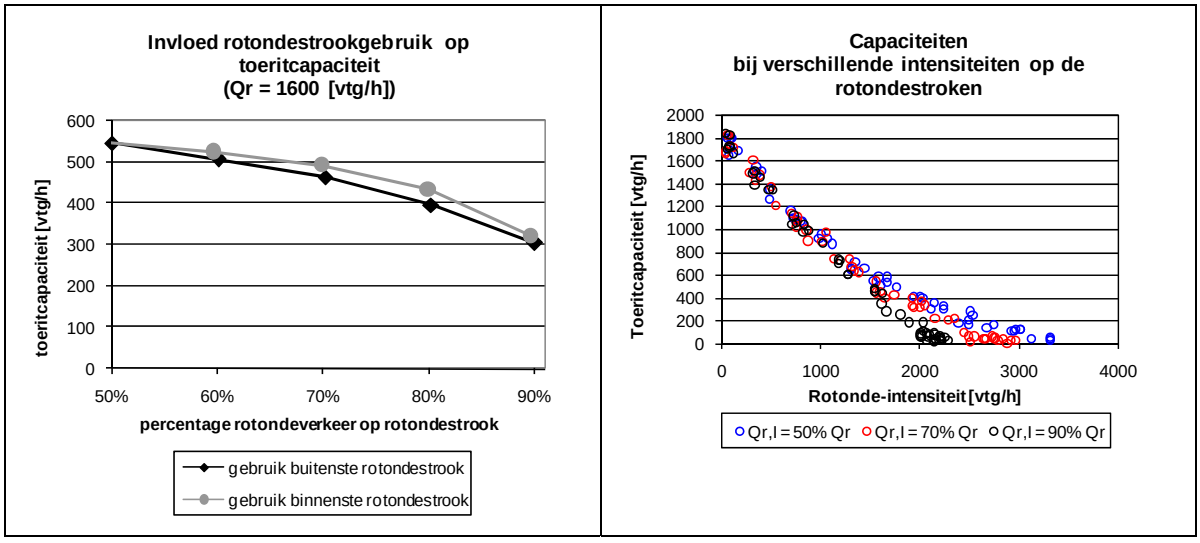
De toeritcapaciteit van de verschillende rotondes is onderzocht door de rotonde-intensiteit, per toeritstrook, te laten varieren op het gehele interval [0,1800] [vtg/h].
Uit het onderzoek is gebleken dat bij één rotondestrook de relatie toeritcapaciteit – rotonde-intensiteit een lineair verband laat zien. Bij twee rotondestroken is dit niet het geval, hier wordt de relatie beschreven door een kromme, zie Figuur 5-14.
Bij de enkelstrooksrotonde is te zien dat de maximale rotonde-intensiteit ongeveer 1750 [vtg/h] bedraagt. Bij de turborotonde is dit, door de twee rotondestroken, twee keer zo veel, ongeveer 3500 [vtg/h]. De kromme van de turborotonde laat dus zien dat er verlies optreedt. Dit verlies komt doordat de voertuigen niet netjes naast elkaar over de rotonde rijden maar enigszins gestaffeld. Hierdoor treden er voor het invoegende verkeer minder bruikbare hiaten op.



Figuur 5-14: Toeritcapaciteiten over het hele rotonde-intesiteitsbereik

5.5.3 Invloed van verdeling van het rotondeverkeer over twee rotondestroken

Uit het onderzoek is gebleken dat de verdeling van het rotondeverkeer over de twee rijstroken grote invloed heeft op de capaciteit. Vooral bij de hogere rotondeintensiteiten is deze invloed aanzienlijk. Daarnaast is ook gebleken dat een merendeel van het verkeer op de buitenste rotondestrook een negatiever effect heeft dan een merendeel op de binnenste rotondestrook. Dit heeft te maken met verschillende kritisch hiaten op de binnenste en buitenste rotondestroken. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 5-15.



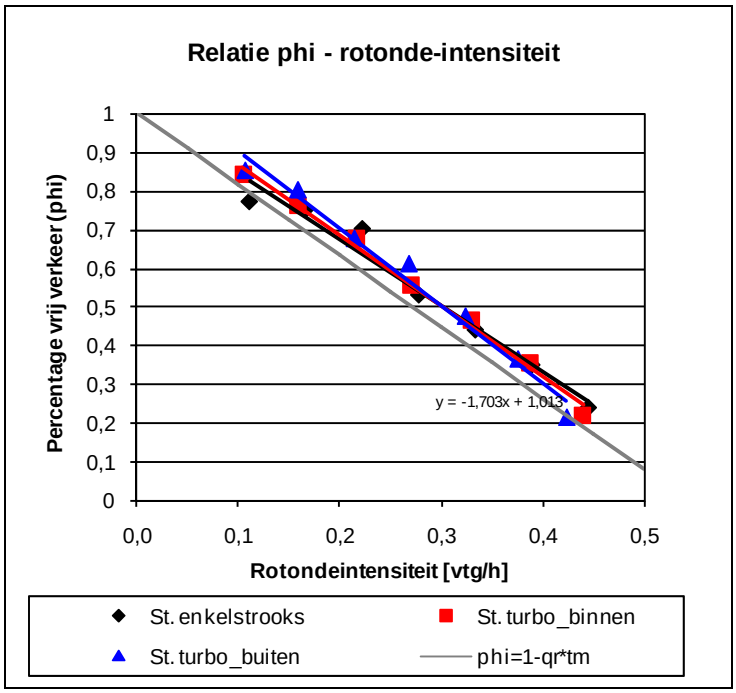
Figuur 5-15: Invloed van verdeling van het rotondeverkeer over twee rotondestroken

5.5.4 Relatie tussen rotonde-intensiteit en percentage vrij rijdend verkeer

Met behulp van het model is een grote hoeveelheid data gegenereerd door het verkeer in één richting over de rotonde te laten rijden. Alle invloeden van (schijn)conflicten van andere verkeersstromen zijn hierdoor geëlimineerd. Het onderzoek is gedaan voor de rotondestroken van de standaard enkelstrooksrotonde en de standaard turborotonde.
De resultaten zijn getoond in Figuur 5-16. Te zien is dat voor alle rotondestroken een vergelijkbare relatie is gevonden. Een algemene functie voor deze relatie is als volgt:

$$\varphi = -1,84 \cdot q_R + 1,06 \qquad (5.2)$$

Ter vergelijking is ook de relatie volgens Tanner weergegeven. Deze relatie ($\varphi=1-q_R*t_M$), voor een t_M van 2,0 seconde, komt niet overeen met de overige relaties.



Figuur 5-16: Relatie tussen percentage vrij rijdend verkeer en rotonde-intensiteit

5.5.5 Invloed van snelheid op de capaciteit

Uit het onderzoek (zie Bijlage D, paragraaf 1.5) is gebleken dat een hogere snelheid, tot op zekere hoogte, een positieve invloed heeft op de capaciteit. Voor de onderzochte rotondes (D=37m en D=50m) is dit het geval tot een snelheid rond de 40 km/h. Deze plafondwaarde is waarschijnlijk afhankelijk van de rotondediameter.

5.5.6 Invloed van de rotondediameter op de capaciteit

Het vorige onderzoekspunt heeft aangetoond dat een hogere snelheid een positief effect kan hebben op de capaciteit. Hierdoor is het te verwachten dat een grotere rotondediameter, wat leidt tot een hogere snelheid, ook een positief effect heeft op de capaciteit. Het onderzoek heeft dit nogmaals bevestigd (zie Bijlage D).

5.5.7 Invloed van richtingsverdeling op de capaciteit

Uit het onderzoek is gebleken dat, bij een gelijk blijvende intensiteit van het rotondeverkeer, de richtingsverdeling van het verkeer slechts een geringe invloed heeft op het percentage vrije voertuigen in de rotondestroom, en de toeritcapaciteit. Wanneer de intensiteiten van Q_1 en Q_2 de intensiteit van Q_R gaan beïnvloeden, heeft dit wél gevolgen voor de toeritcapaciteit.

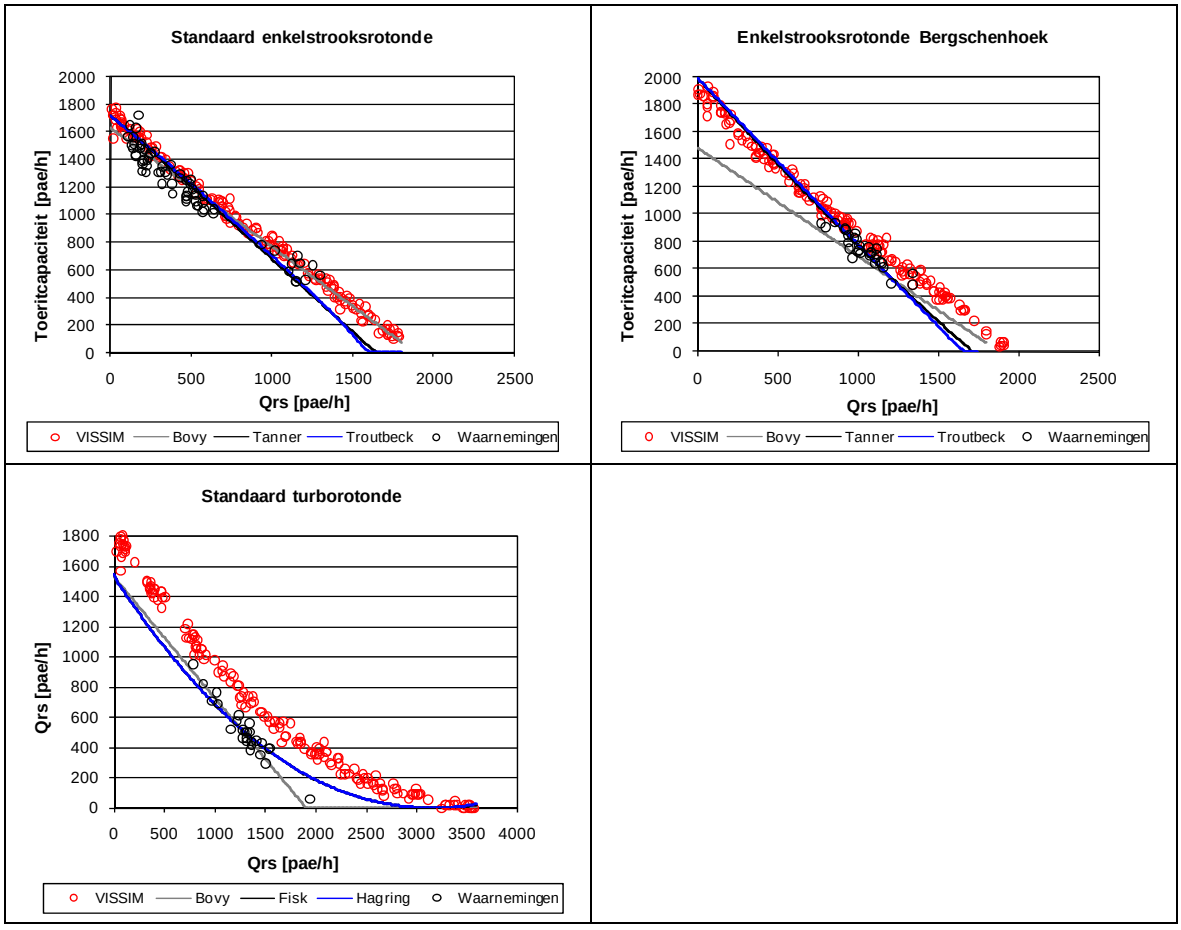
5.5.8 Evaluatie van de parameters van het analytisch model

De evaluatie van de parameters wordt gedaan door de resultaten van het VISSIM model te vergelijken met de resultaten van de capaciteitsformules en de gemeten capaciteiten. Dit is gedaan voor de standaard enkelstrooksrotonde, de enkelstrooksrotonde van Bergschenhoek en de linker toeritstrook met twee rotondestroken van de standaard turborotonde. Deze vergelijking is getoond in Figuur 5-17. Merk op dat de intensiteiten worden weergegeven in personenauto-equivalent in plaats van voertuigen. Dit is gedaan vanwege het gebruik van pae-waarden in het onderzoek naar het analytisch model.

Voor de rechter toeritstrook en de toerit met één rotondestrook van de turborotonde zijn geen capaciteitswaarden beschikbaar. Voor deze toeritten wordt aangenomen dat het verkeer hetzelfde gedrag vertoont als op de enkelstrooksrotonde van Bergschenhoek, omdat de rotondediameters en de breedte van de middengeleiders vergelijkbaar zijn. Na het evalueren van de toeritten waar wél capaciteitswaarnemingen beschikbaar van zijn, zullen vervolgens de overige twee typen toeritten worden behandeld.

Uit de resultaten blijkt dat de resultaten voor de enkelstrooksrotondes in het gemeten intensiteitinterval redelijk overeenkomen. Buiten dit interval wijken de resultaten van elkaar af. De resultaten voor de turborotonde liggen, zoals verwacht, structureel te hoog.

Vanwege de aangetoonde afwijking tussen de capaciteitsformules en de VISSIM-data is besloten de parameters opnieuw te bepalen voor de verschillende rotondes. Dit is op dezelfde wijze gedaan als bij het onderzoek naar het analytisch model.



Figuur 5-17: Evaluatie van de modelparameters

Parameters standaard enkelstrooksrotonde

De bepaling van de parameters van de formule van Bovy is in twee stappen gedaan. Eerst worden de parameters C_0 en *b* geschat uit simulatieresultaten zonder afslaand verkeer. Daarna wordt de invloed van het afslaand verkeer bepaald door de parameter *a* te schatten uit simulatieresultaten mét afslaand verkeer. De bepaling van de parameters voor de hiaatacceptatiemodellen van Tanner en Troutbeck is in drie stappen gedaan. De eerste stap is de bepaling van het kritisch hiaat uit data over het hele intensiteitbereik van het rotondeverkeer. De tweede stap is het bepalen van de oprijvolgtijd. Dit is gedaan voor een situatie met weinig rotondeverkeer (500 vtg/h). De laatste stap is het bepalen van de minimum volgtijd. Dit is gedaan voor veel rotondeverkeer (1600 vtg/h). De resultaten zijn weergeven in Tabel 5-10.

Tabel 5-10: modelparameters standaard enkelstrooksrotonde				
Parameters Bovy			Parameters hiaatacceptatie	
C_0	1695		t_C	3,1
b	0,91		t_F	2,1
a	0,20		t_M	2,2

Parameters enkelstrooksrotonde Bergschenhoek

De bepaling van de parameters van de verschillende capaciteitsmodellen is op dezelfde wijze gedaan als voor de standaard enkelstrooksrotonde. De resultaten zijn weergeven in Tabel 5-11.

Tabel 5-11: modelparameters rotonde Bergschenhoek			
Parameters Bovy		Parameters hiaatacceptatie	
C_0	1841	t_C	3,4
b	0,95	t_F	1,9
a	0,00	t_M	2,0

Parameters linker toeritstrook met twee rotondestroken van standaard turborotonde

De bepaling van de parameters van de verschillende capaciteitsmodellen is op dezelfde wijze gedaan als voor de standaard enkelstrooksrotonde. De bepaling van de parameters is alleen gedaan voor de formule van Hagring. Hiervoor is gekozen omdat uit Figuur 5-17 blijkt dat de toeritcapaciteit van een turborotonde niet kan worden beschreven met een lineair model. Daarnaast wordt aangenomen dat de parameters voor de hiaatacceptatiemodellen voor alle hiaatacceptatiemodellen gelijk zijn.
De resultaten zijn weergegeven in Tabel 5-12.

Tabel 5-12: turborotonde	
Parameters hiaatacceptatie	
t_{C_binnen}	3,0
t_{C_buiten}	3,2
t_F	2,0
t_M	2,2

Parameters overige toeritten van turborotonde

De bepaling van de parameters van de verschillende capaciteitsmodellen is op dezelfde wijze gedaan als voor de standaard enkelstrooksrotonde. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 5-13 en Tabel 5-14.

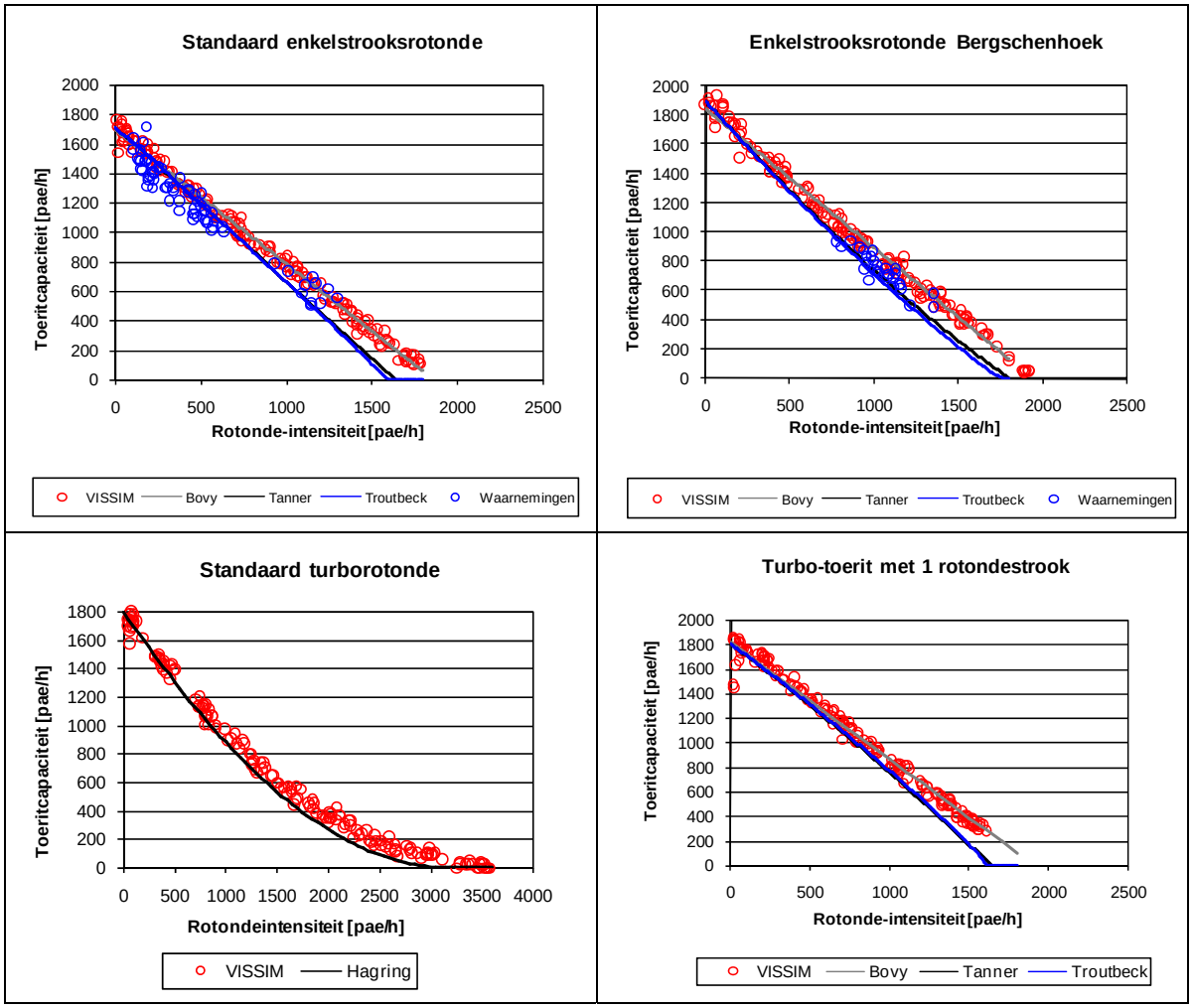
Tabel 5-13: Turbotoerit met 1 rotondestrook			
Parameters Bovy		Parameters hiaatacceptatie	
C_0	1811	t_C	2,9
b	0,95	t_F	2,0
a	0,00	t_M	2,2

Tabel 5-14: Rechter toerit turborotonde			
Parameters Bovy		Parameters hiaatacceptatie	
C_0	1767	t_C	3,0
b	0,94	t_F	2,0
a	0,00	t_M	2,2

5.5.9 Evaluatie van de nieuw bepaalde parameters

Bij het opnieuw bepalen van de parameters is gebleken dat de nieuwe waarden zeer dicht bij elkaar liggen. Dit doet vermoeden dat er een standaard waarde kan worden aangenomen voor de minimale volgtijd. De waarden voor de oprijvolgtijd en het kritisch hiaat zijn waarschijnlijk afhankelijk van de vormgeving van de rotonde.

De betrouwbaarheid van deze nieuwe parameters kan worden getest door de voorgaande evaluatie nogmaals te doen met de nieuwe parameters. De resultaten zijn weegegeven in Figuur 5-18.

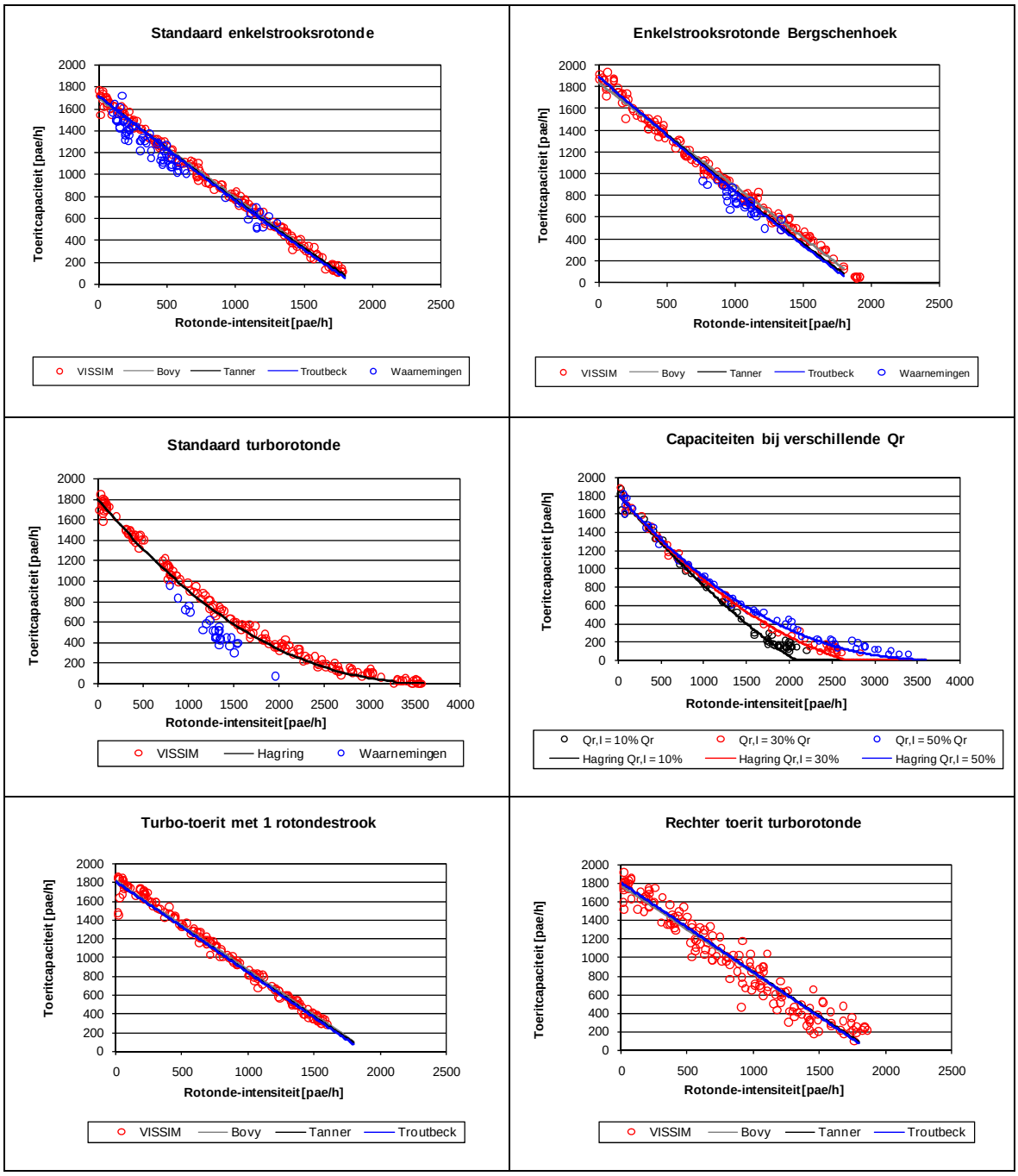


Figuur 5-18: Evaluatie nieuwe parameters

Uit de evaluatie blijkt dat in alle gevallen het hiaatacceptatiemodel voor grotere intensiteiten een te lage toeritcapaciteit voorspelt. Dit doet vermoeden dat de paramater t_M, die de capaciteit hoofdzakelijk beïnvloedt bij hogere intensiteiten, onjuist bepaald is. Wanneer de waarde van t_M lager wordt ingevuld, zal de toeritcapaciteit voor hogere intensiteiten hoger worden berekend.

Figuur 5-19 toont de resultaten van de formules bij invulling van t_M=1,9 [s].

Uit de figuren blijkt dat de aangepaste waarde van t_M voor alle gevallen zeer goede resultaten oplevert. Ook voor de toerit met twee rotondestroken geeft het hiaatacceptatiemodel, bij verschillende verkeersverdelingen over de rotondestroken, zeer goede resultaten.



Figuur 5-19: Resultaten van capaciteitsformules met toepassing van een aangepaste minimale volgtijd

5.6 Conclusies simulatiemodel

Uit het onderzoek is gebleken dat het rijgedrag van automobilisten op rotondes goed gesimuleerd kan worden met het computersimulatieprogramma VISSIM. Met behulp van de computersimulatie is aangetoond dat automobilisten in hun hiaatacceptatiegedrag geen onderscheid maken in het type rotonde of toerit. De verschillen die optreden zijn niet het gevolg van veranderd rijgedrag maar van de rotondevormgeving. Vooral de snelheid van het verkeer op de rotonde, de hoek van invoegen van het toeritverkeer en de verdeling van het verkeer over twee rotondestroken hebben invloed op de capaciteit van een toerit.

Verder is gebleken dat de geïmproviseerde toekenning van het schijnconflict goed lijkt te werken. Het werkelijke schijnconflict kan echter niet gesimuleerd worden in VISSIM en de verschillen die optreden tussen gesimuleerde en gemeten resultaten zijn hoogstwaarschijnlijk toe te kennen aan het schijnconflict. Op dit punt is VISSIM voor verbetering vatbaar.

Uit de resultaten blijkt dat de toeritcapaciteiten volgens VISSIM goed beschreven kunnen worden met de beschikbare capaciteitsformules. Een vergelijking van de VISSIM resultaten met de praktijkmetingen heeft bevredigende resultaten opgeleverd voor het intensiteitinterval van de praktijkmetingen. De resultaten buiten dit interval kunnen niet vergeleken worden vanwege het gebrek aan bruikbare data. Vooral voor de turborotonde en de enkelstrooksrotonde met een grote diameter is de beschikbare data beperkt en van slechte kwaliteit. Een complete validatie van de VISSIM modellen van deze rotondetypen is dus niet mogelijk.

Aangenomen wordt dat de resultaten van de VISSIM modellen redelijk overeenkomen met de werkelijkheid omdat de gemodelleerde rotondes op dezelfde manier zijn opgebouwd en ingesteld. Indien het rijgedrag van automobilisten werkelijk constant is voor verschillende typen rotondes zullen de uitkomsten van het model goed moeten zijn. Wanneer echter kritisch naar de simulatieresultaten wordt gekeken lijken deze enigszins optimistisch maar een goede controle is, zoals al opgemerkt, niet goed mogelijk.

De toeritcapaciteit en rotonde-intensiteit laten bij één rotondestrook een lineaire relatie zien en bij twee rotondestroken een niet-lineaire relatie. Hierdoor valt de formule van Brilon af als geschikt model. De formule van Brilon beschrijft de toeritcapaciteit als een e-macht, waardoor de berekende capaciteiten, bij één rotondestrook, te hoog uit zullen vallen bij hoge rotonde-intensiteiten. Voor een toerit met twee rotondestroken is de formule van Brilon eveneens niet bruikbaar, omdat deze formule de capaciteit van de gehele toerit berekent in plaats van alleen de linker toerit, zie ook paragraaf 4.5.2.

Een laatste conclusie die uit de studie kan worden getrokken is dat de methode van Hoogendoorn geen goede methode is om de waarde van t_M van het volgtijdmodel van Cowan precies te bepalen. Waarschijnlijk is er geen goede methode beschikbaar om deze parameter juist te kunnen bepalen uit de data. Dit is wellicht de reden dat zowel Sullivan, Troutbeck en Hagring een vaste waarde voor t_M aannemen en deze parameter niet afzonderlijk bepalen. De waarde voor t_M die volgens deze studie het beste resultaat geeft ligt met 1,9 [s] precies tussen de 2,0 [s] van Sullivan & Troutbeck en de 1,8 [s] van Hagring in. Dit geeft aan dat de aanname van een waarde van 1,9 [s] waarschijnlijk niet eens zo slecht is.

6 Geometrisch rotondeontwerp

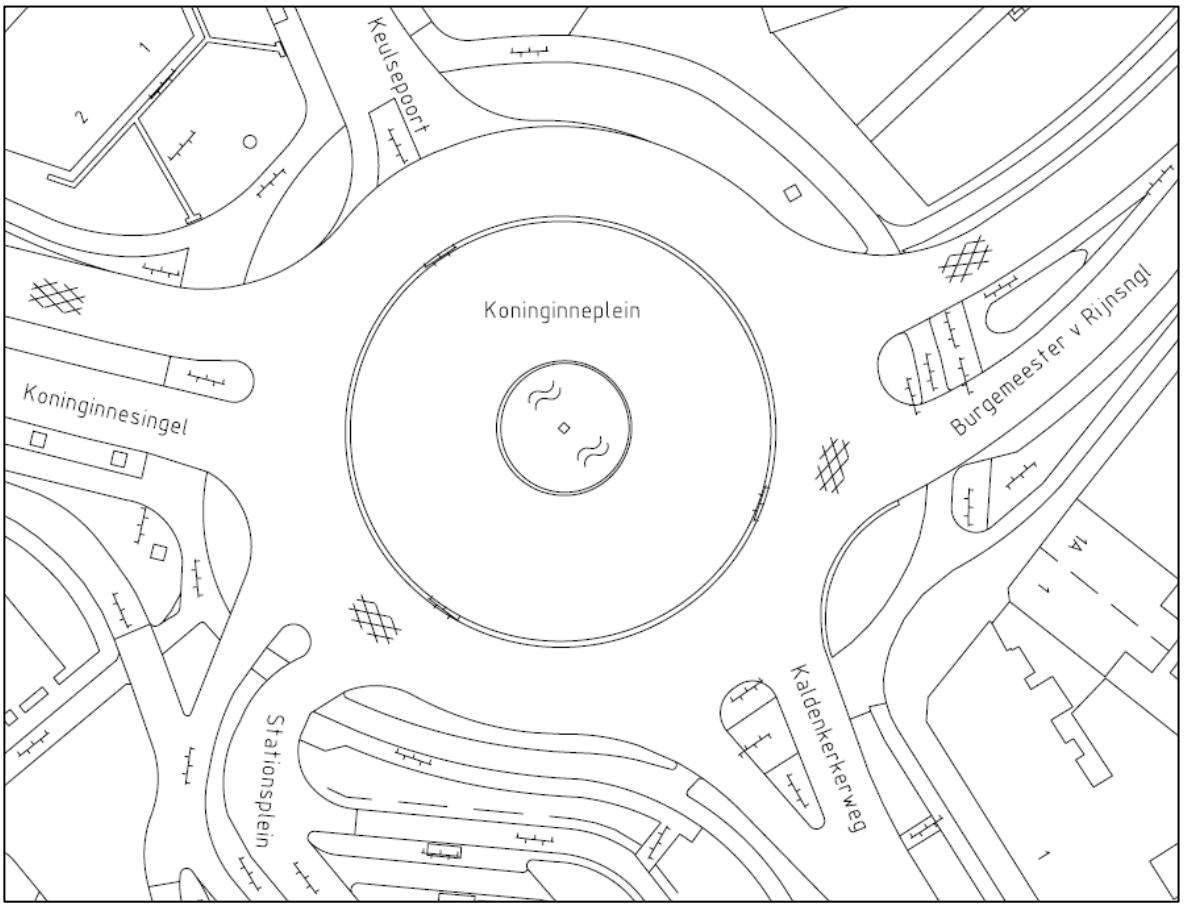
De vorige twee hoofdstukken van dit rapport beschrijven de theoretische werking van een turborotonde, en geven een beeld van hoe een turborotonde presteert onder bepaalde omstandigheden. Om deze kennis een praktische toepassing te geven is een geometrisch turborotonde-ontwerp gemaakt.

6.1 Algemeen

In deze paragraaf wordt beschreven welke praktijksituatie is gekozen voor het ontwerp en aan welke eisen het ontwerp moet voldoen.

6.1.1 Locatie nieuw te ontwerpen rotonde

Voor het ontwerp is gekozen voor het herinrichten van een bestaande meerstrooksrotonde tot een turbovariant. De situatie waarvoor het ontwerp is gemaakt is het Koninginneplein in Venlo. De huidige situatie op dit plein is een driestrooksrotonde met vijf takken, waarvan één tak leidt tot het stationsplein met busstation en één tak, Keulsepoort, leidt tot een voetgangersgebied en dus eventueel gezien kan worden als inrit. De rotonde is gelegen in de binnenstad en hierdoor zal er een aanzienlijke hoeveelheid fiets- en voetgangersverkeer aanwezig zijn. Er is gekozen voor deze rotonde omdat de complexiteit het niet toelaat een standaard ontwerp over te nemen, waardoor een ontwerp op maat moet worden gemaakt. De bestaande situatie is weergegeven in Figuur 6-1.



Figuur 6-1: Huidige situatie Koninginneplein te Venlo

6.1.2 Gestelde eisen aan het ontwerp

De rotonde moet bovenal voldoende capaciteit hebben om het aangeboden verkeer te verwerken. De capaciteit van de rotonde wordt bepaald met behulp van de analytische formules. Daarnaast moet de rotonde voldoen aan de algemeen geldende richtlijnen voor het ontwerpen van rotondes. Voor het geometrisch ontwerp zijn de richtlijnen aangehouden zoals die zijn beschreven in de volgende documenten (in hiërarchische volgorde):

- Handleiding wegontwerp provincie Zuid-Holland, deel Rotondes en Turborotondes
- CROW-publicatie 126 "Eenheid in rotondes" [17]
- CROW ASVV 2004 [18]

Naast deze functionele eisen moet de rotonde ook voldoen aan de verkeersveiligheid en zal worden getoetst op doorrijsnelheid. Deze toets is gebaseerd op de CROW-publicatie 126 "Eenheid in rotondes" en wordt onderstaand toegelicht voor toepassing op een turborotonde.

Doorrijsnelheid op een Turborotonde

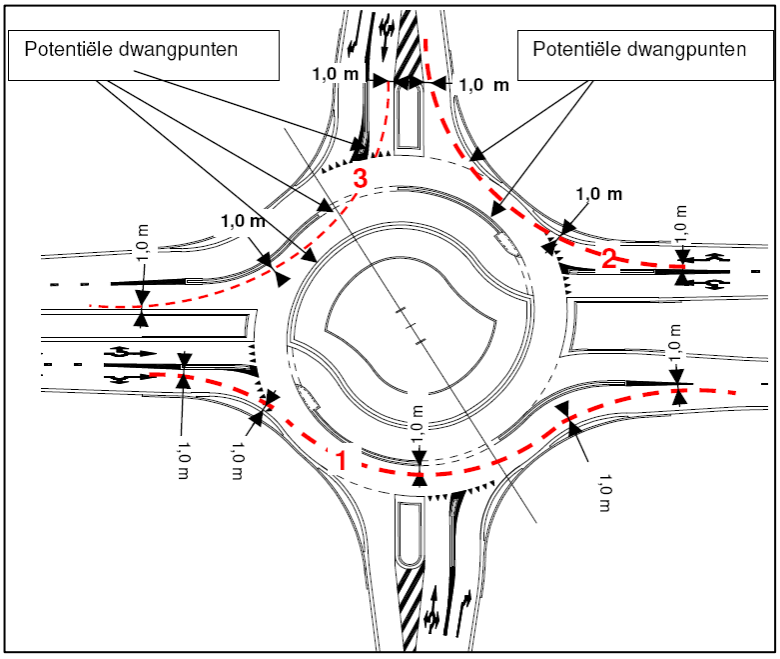
De doorrijsnelheid moet worden getoetst voor de volgende drie richtingen:

1. Rechtdoorgaand verkeer
2. Rechtsafslaand verkeer
3. Linksafslaand verkeer

Aangenomen wordt dat de doorrijsnelheid wordt bepaald door de boogstralen van de curven die de voertuigen moeten rijden bij het nemen van de rotonde, wanneer het voertuig de "ideale lijn" volgt. Deze ideale lijn kan worden getekend door een vloeiende lijn, die het midden van een voertuig representeert en bestaat uit één boog of drie opeenvolgende tegengestelde bogen, te tekenen over de rotonde. Hierbij dient de lijn niet dichter dan 1 meter bij de kant van de verharding te liggen. Een voertuig breder dan 2m dient gebruik te maken van de rammelstroken of de overrijdbare rijstrookscheidingen. Figuur 6-2 geeft een grafische weergave van de ideale lijnen voor de drie bovengenoemde richtingen.
De doorrijsnelheid behorende bij de rijcurven kan worden berekend met de formule:

$$snelheid = 7,4 \cdot \sqrt{R_{rijcurve}} \tag{5.3}$$

Dit houdt in dat de stralen van de rijcurven bij voorkeur niet groter zijn dan 22,4 m (overeenkomend met een doorrijsnelheid van 35 km/h) à 25 m (overeenkomend met 37 km/h).



Figuur 6-2: Doorrijcurven op een turborotonde

6.2 Inventarisatie

Het Koninginneplein is een driestrooksrotonde met vijf takken. Alle takken hebben een toe- en afrit die bestaan uit maximaal twee rijstroken. Eén van deze takken leidt naar het busstation op het stationsplein. Deze tak zal dus voornamelijk bussen moeten verwerken. Van de overige takken hebben de Koninginnesingel en de Burgemeester van Rijnsingel tweestrooks toe- en afritten, heeft de Kaldenkerkerweg een tweestrooks toerit en een enkelstrooks afrit en heeft de Keulsepoort enkelstrooks toe- en afritten. Daarnaast bevindt zich op iedere tak een oversteekplaats voor zowel voetgangers als fietsers. De huidige situatie is dat de voetgangers en fietsers voorrang hebben op de rotonde.

De intensiteiten gedurende de spits van het motorvoertuigenverkeer op de rotonde zijn weergegeven als herkomst/bestemmingsmatrix (H/B-matrix) in Tabel 6-1 en Tabel 6-2. Getoond zijn de intensiteiten van 2004 en de verwachte intensiteiten voor 2020. De intensiteiten van het fiets- en voetgangerverkeer zijn niet bekend.

Uit deze H/B-matrices valt af te leiden dat de het overgrote deel van het verkeer rijdt tussen de Koninginnesingel, de Kaldenkerkerweg en de Burg. van Rijnsingel. De Keulsepoort is ook redelijk belast maar de tak naar het stationsplein wordt nagenoeg niet gebruikt, waarschijnlijk alleen door busverkeer. Daarnaast valt op dat de intensiteiten voor 2004 hoger liggen dan voor 2020. Dit heeft waarschijnlijk te maken met nieuw aan te leggen infrastructuur in de regio van Venlo. Voor de capaciteitstoets van de nieuw te ontwerpen rotonde wordt uitgegaan van de intensiteiten van 2004, aangezien deze hoger zijn dan voor 2020.

De nummers van de weergegeven richtingen representeren de volgende straten:
1. Koninginnesingel
2. Stationsplein
3. Kaldenkerkerweg
4. Burg. van Rijnsingel
5. Keulsepoort

Tabel 6-1: Herkomst – Bestemming [vtg/h], avondspits 2004

Richting	1	2	3	4	5	Totaal
1	0	4	559	558	179	**1300**
2	6	0	4	6	1	**17**
3	400	2	0	34	196	**632**
4	578	3	1	0	18	**600**
5	312	1	142	5	0	**460**
Totaal	**1296**	**10**	**706**	**603**	**394**	***3009***

Tabel 6-2: Herkomst – Bestemming [vtg/h], avondspits 2020

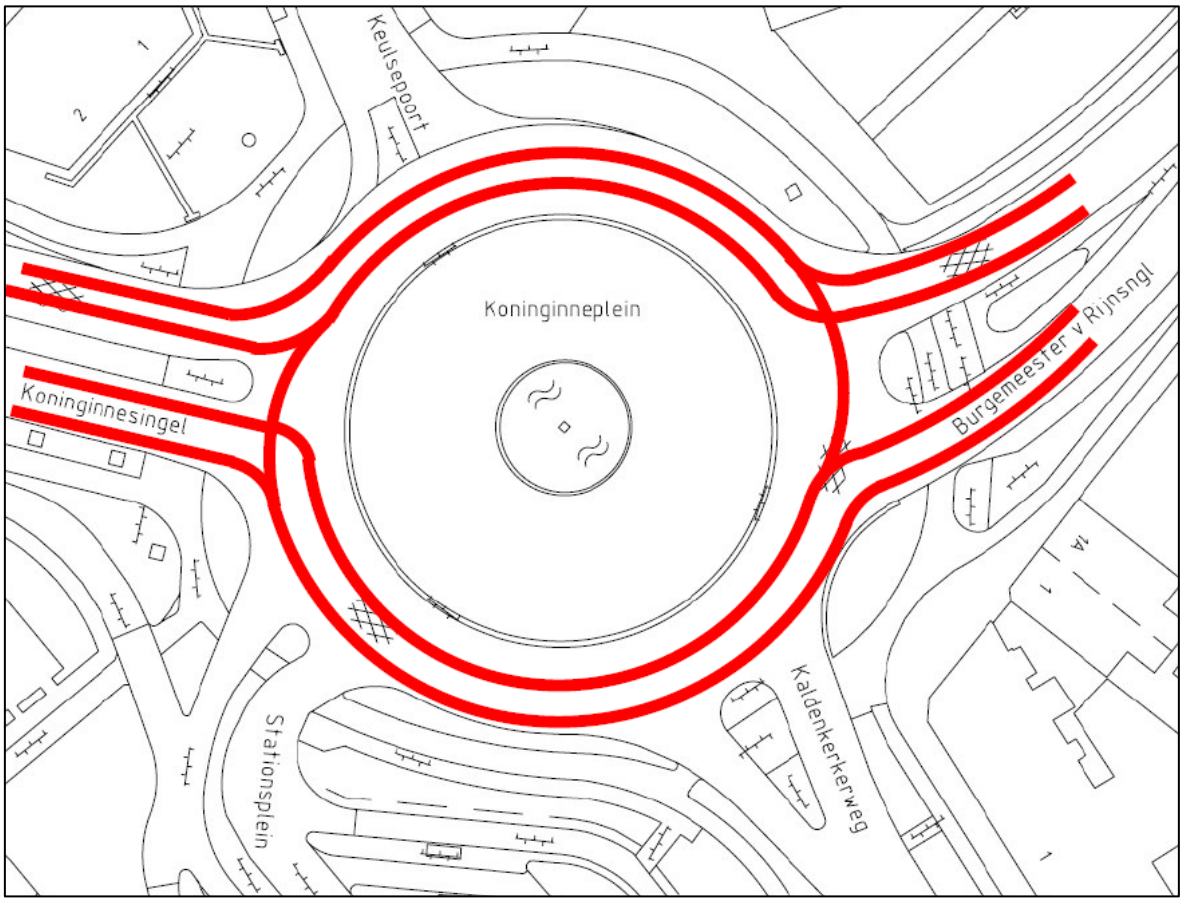
Richting	1	2	3	4	5	Totaal
1	0	4	453	342	352	**1151**
2	6	0	3	3	2	**14**
3	253	1	0	14	135	**403**
4	884	2	2	0	6	**894**
5	167	1	51	1	0	**220**
Totaal	**1310**	**8**	**509**	**360**	**495**	***2682***

6.3 Rotondekeuze

In deze paragraaf wordt de keuze van het type rotonde onderbouwd. Eerst zal een keuze worden gemaakt voor een type rotonde, en uit een capaciteitsberekening moet blijken of dit type voldoet. Uit deze capaciteitsberekening volgt een verhouding tussen de intensiteit en de capaciteit (I/C-waarde) van de rotonde.
Vervolgens worden twee ontwerpen behandeld voor het gekozen type. Het eerste ontwerp is een logisch gevolg van de combinatie van de huidige situatie en het basisprincipe van de turborotonde. Het tweede ontwerp is gebaseerd op het standaard turborotonde ontwerp met een kleinere rotondediameter, lagere doorrijsnelheden en hogere verkeersveiligheidseisen.

6.3.1 Keuze voor type rotonde

Wanneer wordt gekeken naar de intensiteiten is, zonder berekening, te zien dat een turborotonde hoogstwaarschijnlijk voldoende capaciteit heeft om het verkeersaanbod te kunnen verwerken. Wanneer het huidige aantal rijstroken op de verschillende toe- en afritten niet wordt gewijzigd volgt logischerwijs een turborotonde met een hoofdstroom tussen de Koninginnesingel en de Burgemeester van Rijnsingel. Dit resulteert in de rotondestromen zoals schematisch weergegeven in Figuur 6-3.
Dit heeft tot gevolg dat de Koninginnesingel en de Burgemeester van Rijnsingel een tweestrooks toerit hebben met één rotondestrook, de Kaldenkererweg een tweestrooks toerit met twee rotondestroken en de overige takken enkelstrooks toeritten met twee rotondestroken.



Figuur 6-3: Hoofdverkeersstromen op het Koninginneplein te Venlo

6.3.2 Capaciteitsberekening

Aan de hand van de H/B-matrix, zie paragraaf 6.2, kunnen de toerit-, afrit- en rotondeintensiteiten worden afgeleid. Hierbij is er van uitgegaan dat het verkeer zich, indien mogelijk, gelijkmatig verdeeld over de twee toeritstroken.
Nadat de verschillende intensiteiten bekend zijn kan met behulp van de capaciteitsformules, zoals beschreven in het hoofdstuk van het analytisch model, de capaciteit van de verschillende toeritten worden berekend. Voor de capaciteitsberekening voor deze rotonde is gekozen voor toepassing van de formule van Troutbeck voor toeritten met één rotondestrook, en de formule van Hagring voor toeritten met twee rotondestroken. Er is gekozen voor deze formules omdat die het rijgedrag van de automobilisten het meest gedetailleerd beschrijven.

De intensiteiten, de berekende capaciteiten en de daar bijbehorende I/C-verhoudingen zijn getoond in Tabel 6-3. De capaciteitsberekening is in eerste instantie uitgevoerd voor de avondspits intensiteiten. Dit is gedaan omdat alleen deze intensiteiten zijn verkregen van Gemeente Venlo. Om te kijken of de rotonde ook voldoet voor de ochtendspits zijn de intensiteiten van de avondspits omgedraaid. De resultaten voor deze intensiteiten zijn weergegeven in Tabel 6-4. Uit de resultaten blijkt dat, met een I/C-verhouding van 0,82 de rotonde voldoet aan de capaciteitseis, mits de intensiteiten niet meer groeien. Aangezien de voorspelde intensiteiten van 2020 lager liggen zal dit geen probleem zijn.

Tabel 6-3: Capaciteitsberekening [vtg/h], avondspits 2004

Tak	Toerit	Q_E	Q_S	Q_{R_I}	Q_{RS_U}	C_E	I/C
Koninginnesingel	links	650	294		228	1562	0,42
	rechts	650			154	1638	0,40
Stationsplein	links	9	10	650	797	622	0,01
	rechts	9	10		797	998	0,01
Kaldenkerkerweg	links	598	706	659	273	947	0,63
	rechts	34			97	1698	0,02
Burg. Van Rijn	links	300	473		902	899	0,33
	rechts	300			784	1010	0,30
Keulsepoort	links	148	394	300	789	826	0,18
	rechts	312	394		789	1006	0,31

Tabel 6-4: Capaciteitsberekening [vtg/h], ochtendspits 2004

Tak	Toerit	Q_E	Q_S	Q_{R_I}	Q_{RS_U}	C_E	I/C
Koninginnesingel	links	648	258		323	1464	0,44
	rechts	648			259	1530	0,42
Stationsplein	links	5	17	648	894	565	0,01
	rechts	5	17		894	906	0,01
Kalderkerkerweg	links	705	632	653	421	855	**0,82**
	rechts	1			263	1526	0,00
Burg. Van Rijn	links	302	336		1106	713	0,42
	rechts	302			1022	789	0,38
Keulsepoort	links	215	460	302	979	678	0,32
	rechts	179	460		979	828	0,22

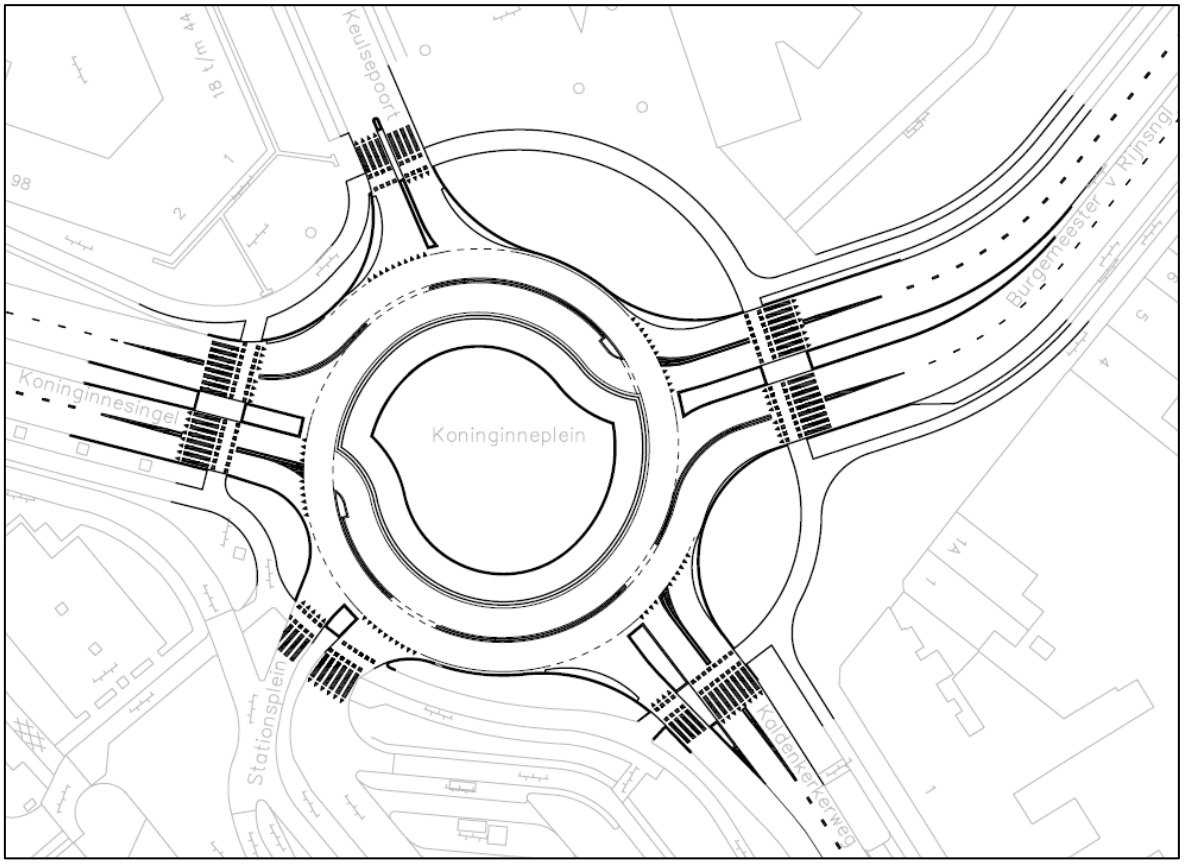
Bij deze berekening is gebruik gemaakt van de parameterwaarden volgens de resultaten van het simulatiemodel. Verder wordt uitgegaan van een breedte van de middengeleider van 2,5 meter en een daarbijbehorende waarde van 0,25 [-] voor de invloed van het schijnconflict (d). Deze waarde zal gelden als de minimale breedte die in het ontwerp mag worden toegepast. Wanneer er een bredere middengeleider wordt toegepast zal het schijnconflict minder worden en dit heeft een gunstige invloed op de capaciteit. Wanneer de capaciteit voor een middengeleider van 2,5 meter voldoet, zal de capaciteit voor een bredere middengeleider zeker voldoen.

6.3.3 Ontwerp op basis van huidige situatie met turboprincipe

Bij het ontwerp van deze rotonde is getracht de bestaande situatie zo min mogelijk te veranderen waardoor de aanlegkosten (hier wordt verder niet op ingegaan) zo laag mogelijk worden gehouden en het plein nagenoeg dezelfde functie houdt wat betreft stedelijke inpassing. Daarnaast zullen de huidige voorrangsregels worden gehandhaafd, zodat de weggebruikers zo min mogelijk hoeven te wennen aan de nieuwe situatie. Het ontwerp van deze rotonde is dan ook gebaseerd op de huidige rotonde met toepassing van het in paragraaf 6.3 gekozen rotondetype. De gekozen rotondediameter is kleiner dan de huidige diameter en is zodanig gekozen dat de takken goed aansluiten.

Het ontwerp van deze rotonde is weergegeven in Figuur 6-4. De dimensionering van de ontwerpelementen is beschreven in paragraaf 6.4.

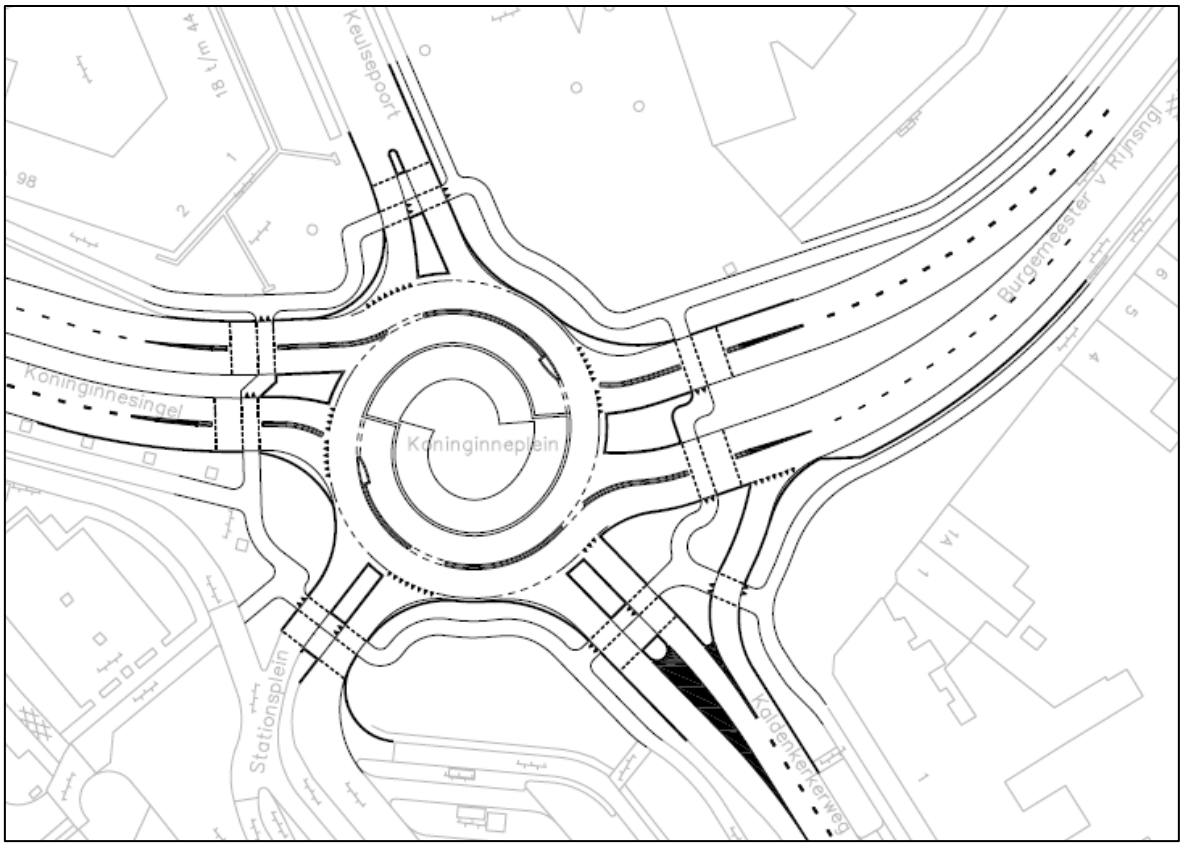
Na toetsing van de doorrijsnelheid is gebleken dat deze rotonde niet voldoet aan de gestelde eisen waardoor het motorvoertuigenverkeer met een te hoge snelheid, ongeveer 50 km/h, de rotonde kan passeren. Dit zal een negatief effect hebben op de verkeersveiligheid. Vanwege het falen van dit ontwerp voor deze toets is een tweede ontwerp gemaakt.



Figuur 6-4: Ontwerp op basis van de huidige situatie met het turboprincipe

6.3.4 Ontwerp op basis van standaard turborotonde

Bij dit ontwerp wordt extra aandacht besteed aan de verkeersveiligheid en in het bijzonder de doorrijsnelheid. Waar het vorige ontwerp niet voldeed aan de eis betreffende de doorrijsnelheid doet deze dat wel. Het ontwerp is getoond in Figuur 6-5.
Om tot dit ontwerp te komen is gebruik gemaakt van een kleinere rotondediameter, gelijk aan die van de standaard turborotonde, en toeritten die meer op het midden van de rotonde aansluiten. Dit heeft tot gevolg gehad dat toerit voor rechtsaf op de Kaldenkerkerweg is uitgevoerd als bypass, omdat een voldoende ruime boog tussen de Kaldenkerkerweg en de Burgermeester van Rijnsingel niet past.
Naast het verkleinen van de doorrijcurven is ook het langzame verkeer uit de voorrang gehaald. Dit is gedaan omdat wordt aangenomen dat fietsverkeer uit de voorrang leidt tot een hogere verkeersveiligheid[13]. Het begin van de binnenste rotondestrook is in dit ontwerp uitgevoerd als een haakse inrit, in plaats van een vloeiende inrit zoals is gebruikt bij het ontwerp van de andere rotonde. Deze haakse inrit verduidelijkt visueel de verkeerssituatie op de rotonde. Een voertuig dat op de linker toerit staat te wachten kan bij een haakse inrit de beginnende rotondestrook beter onderscheiden van de buitenste rotondestrook.



Figuur 6-5: Ontwerp op basis van standaard turborotonde

[13] Deze studie is niet gericht op verkeersveiligheid. Juistheid van deze aanname zal verder niet worden onderzocht.

6.4 Dimensionering ontwerpelementen

In deze paragraaf worden de ontwerpelementen van de ontworpen turborotondes voor het Koninginneplein, en de dimensionering hiervan, nader toegelicht. De volgende ontwerpelementen worden behandeld:

- Buitendiameter van de rotonde
- Middelpunt van de rotonde
- Boogstalen
- Breedte van de rijstroken
- Breedte van de middengeleiders
- Verschoven middelpunt van de rotondediameters
- Oversteekplaatsen

Voor de verschillende ontwerpelementen gelden dezelfde richtlijnen voor beide ontwerpen. De dimensionering van de meeste ontwerpelementen zal dan ook gelijk zijn voor beide rotondes. Wanneer dit niet het geval is, zullen beide ontwerpen afzonderlijk worden behandeld.
In het vervolg wordt het ontwerp op basis van huidige situatie met turboprincipe de "grote rotonde" genoemd, en het ontwerp op basis van standaard turborotonde de "kleine rotonde".

6.4.1 Buitendiameter

De buitendiameter van een standaard turborotonde is te klein om vijf, in plaats van vier, takken toegang te geven tot de rotonde. Wanneer er vijf takken worden ingepast bij een standaard rotondediameter zullen de boogstralen voor in- en uitvoegend verkeer te klein worden. Om toch de vijf takken aan te kunnen sluiten is een grotere diameter noodzakelijk. Hierdoor wijken de rotondediameters van de twee ontwerpen van elkaar af.

Ontwerp grote rotonde

Aangezien de standaard rotondediameter te klein is om vijf takken aan te sluiten is een grotere diameter gekozen die kleiner van de standaard turborotonde. Voor de turborotonde die is ontworpen voor het Koninginneplein is een buitendiameter van 60 meter gebruikt. Deze diameter is precies groot genoeg voor het aansluiten van de vijf takken.

Ontwerp kleine rotonde

Het ontwerp van de kleine rotonde is gebaseerd op de standaard turborotonde. De gekozen binnendiameter voor de kleine rotonde is dan ook gelijk aan die van de standaard turborotonde (44 meter). Het probleem wat betreft de boogstralen is opgelost door het toepassen van een bypass waar de boogstraal te krap werd.

6.4.2 Middelpunt

Het middelpunt van de rotonde moet zodanig worden gekozen dat alle takken enigszins haaks kunnen aansluiten op de rotonde op een relatief gelijke afstand van elkaar.

Ontwerp grote rotonde

Bij het kiezen van het middelpunt van de grote rotonde is gebleken dat de hoek tussen de takken van de Koninginnesingel en het Stationsplein maatgevend is. Vanwege de inrichting van het terrein rond deze takken, het busstation en een rij bomen, is het verleggen van deze takken ongewenst. Het terrein rond de overige takken geeft wel enige vrijheid.
Het middelpunt is uiteindelijk zodanig gekozen dat takken van de Koninginnesingel en het Stationsplein nagenoeg ongewijzigd blijven.

Ontwerp kleine rotonde

Toepassen van een kleinere rotondediameter heeft als bijkomend voordeel dat er meer ruimte beschikbaar is voor het verleggen van de aansluitende wegen. Hierdoor is er meer ruimte om te schuiven met het middelpunt van de rotonde. De locatiekeuze van het middelpunt is vooral gebaseerd op het, zoveel mogelijk, haaks op de rotonde aansluiten van de toeritten Koninginnesingel, Burgemeester van Rijnsingel en Keulsepoort. Hierbij zijn ook de rijbanen van de genoemde toeritten enigszins verbogen om optimaal aan te sluiten.
Merk op dat voor dit ontwerp is gekozen alleen de toeritten haaks te laten aansluiten, terwijl voor het andere ontwerp is gekozen voor het haaks aansluiten van de gehele tak.

6.4.3 Boogstralen

Op de rotonde gelden vaste waarden voor de boogstralen. Op de rotonde worden twee verschillende boogstralen onderscheiden, te weten een boogstraal voor oprijdend verkeer en een boogstraal voor afrijdend verkeer. De gewenste snelheid van het verkeer dat de rotonde op rijdt dient lager te zijn dan de snelheid van het verkeer dat de rotonde verlaat. Dit heeft tot gevolg dat de boogstraal voor oprijdend verkeer kleiner moet zijn dan de boogstraal voor afrijdend verkeer.

Voor beide ontwerpen is gekozen voor boogstralen conform de richtlijnen van de CROW [17]. De waarden van deze boogstralen zijn:

- 12 meter voor oprijdend verkeer;
- 15 meter voor afrijdend verkeer.

Deze boogstralen zijn toegepast op alle bogen, met uitzondering van de tak van het Stationsplein. De vormgeving van deze tak is onveranderd gebleven. Er wordt aangenomen dat deze tak in de huidige situatie voldoet en zodoende ook in nieuwe situatie zal voldoen.

6.4.4 Breedte van de rijstroken

Voor het ontwerp is gebruik gemaakt van verschillende rijstrookbreedtes voor de volgende soorten rijstroken:

- Rijstrook op de toerit = 4,0 meter
- Rijstrook op de afrijt = 4,5 meter
- Rijstroken op de rotonde = 5,0 meter

Voor beide ontwerpen is gekozen voor rijstrookbreedtes conform het standaard ontwerp van de turborotonde van Provincie Zuid-Holland. In enkele gevallen was niet mogelijk de gewenste rijstrookbreedtes aan te houden. In deze gevallen is een minimale breedte van 3,80 meter aangehouden. Aangenomen wordt dat deze breedtes voldoen omdat deze reeds in de huidige situatie aanwezig zijn. De verschillende soorten rijstroken zullen onderstaand achtereenvolgens worden behandeld.

De in deze paragraaf vermelde breedtes zijn gemeten van kant verharding tot kant verharding.

Rijstrook op de toerit

De takken van de Koninginnesingel en van het Stationsplein zijn niet verlegd waardoor de rijbaanbreedtes ongewijzigd blijven. Deze bestaande breedte van de Koninginnesingel laat de toepassing van de gewenste rijstrookbreedtes niet toe. Er is gekozen om de bestaande breedte van de rijbaan te behouden en evenredig te verdelen over twee rijstroken. Dit levert een rijstrookbreedte op van 3,90 meter. De toerit van het Stationsplein blijft ongewijzigd.
De toeritstroken op de overige takken worden wel verlegd en worden aangelegd met een breedte van 4,00 meter.

Rijstrook op de afrit

Voor de afritten geldt hetzelfde als voor de toeritten. De rijbaanbreedte van de Koninginnesingel laat het wederom niet toe om de gewenste rijstrookbreedtes toe te passen. Net als voor de toerit is de breedte van de rijbaan evenredig verdeeld over de rijstroken. Dit resulteert in een rijstrookbreedte van 4,00 meter.
De afritstroken op de overige takken worden aangelegd met een breedte van 4,50 meter.

Rijstroken op de rotonde

Op de rotonde wordt onderscheidt gemaakt tussen de binnenste en de buitenste rotondestrook. Voor de binnenste rotondestrook geldt een rijbaanbreedte die kleiner wordt naarmate de het voertuig verder over de rotonde rijdt. De beginnende breedte is 5,30 meter en wordt kleiner tot een breedte van 5,00 meter, waar de binnenstrook overgaat in de buitenstrook. De buitenstrook heeft over de gehele lengte een breedte van 5,00 meter.

6.4.5 Breedte van de middengeleiders

Als minimale breedte van de middengeleider is de waarde van 2,50 meter gebruikt die wordt aanbevolen door de CROW en is toegepast voor beide ontwerpen. Er is gestreefd naar een breedte van 3,00 meter om fietsers en voetgangers meer ruimte te geven bij het oversteken van de tweestrooks toe- en afritten.

Ontwerp grote rotonde

Voor alle middengeleiders, met uitzondering van die van de Keulsepoort, is een breedte toegepast van 3,00 meter. De rijbaanbreedte van de Keulsepoort liet een dusdanig brede middengeleider niet toe. Voor deze tak is gekozen voor een breedte van 0,90 meter. Aangenomen wordt dat, vanwege de geringe intensiteit van gemotoriseerd verkeer, dit geen problemen op zal leveren.

Ontwerp kleine rotonde

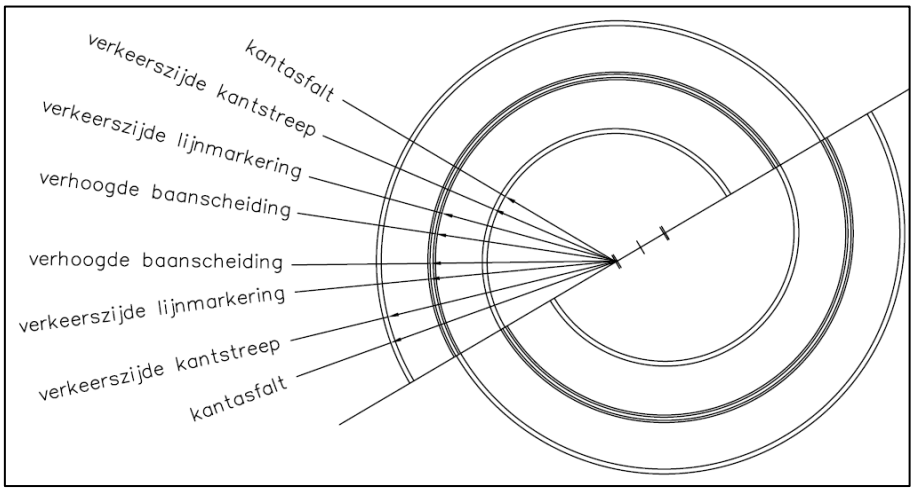
Aangezien het langzame verkeer geen voorrang heeft op deze rotonde is getracht de middengeleiders breder te maken dan 3,50 meter. Dit resulteerde in de volgende breedtes:

- Koninginnesingel = 3,50 meter
- Stationsplein = 3,00 meter
- Kaldenkerkerweg = 3,50 meter
- Burg. van Rijnsngl = 7,00 meter
- Keulsepoort = 4,90-1,40 meter

De middengeleider van het Stationsplein is gelijk gehouden aan de huidige situatie, die van de Burgemeester van Rijnsingel is groter gehouden vanwege de beschikbare ruimte en die van de Keulsepoort is kleiner uitgevallen omdat de breedte van de Keulsepoort een bredere middengeleider niet toelaat.

6.4.6 Verschoven middelpunt van de rotondediameters

De translatie-as is de as waarover de middelpunten van de verschillende rotondediameters worden verschoven. De lengte van deze verschuiving is afhankelijk van de rijstrookbreedte en de locatie van de lijnmarkering. Voor dit ontwerp is een verschuiving van 5,05 meter gebruikt. Dit is conform het ontwerp van de standaard turborotonde van Provincie Zuid-Holland en wordt gebruikt voor beide ontwerpen. Een voorbeeld van de verschuiving van de middelpunten is gegeven in Figuur 6-6. De waarde 5,05 meter is gebaseerd op een rijstrookbreedte van 5 meter en een verspringing van 5 centimeter om de belijning op elkaar aan te laten sluiten.



Figuur 6-6: Verschoven middelpunt van de rotondediameters

6.4.7 Oversteekplaatsen

De oversteekplaatsen voor voetgangers en fietsers zijn gedimensioneerd volgens de richtlijnen van de CROW.

7 Conclusies en Aanbevelingen

7.1 Conclusies

Uit de studie is gebleken dat de turborotonde beter functioneert dan voorheen werd gedacht. Daarnaast is gebleken dat het rijgedrag, wat betreft hiaatacceptatie en volggedrag, van automobilisten op verschillende typen rotondes sterke overeenkomsten laat zien. Dit doet vermoeden dat automobilisten verschillende typen rotondes op dezelfde wijze benaderen. De verschillen die optreden worden waarschijnlijk veroorzaakt door de vormgeving van de rotonde, en dan met name door de rotondediameter wat van invloed is op de rotondesnelheid, hoek van invoegen en de breedte van de middengeleider.

Uit de vergelijking van de simulatieresultaten met de resultaten van de capaciteitsformules is gebleken dat de capaciteit van een toerit met één rotondestrook zich zeer goed laat beschrijven door zowel een lineair verkeersstroommodel, zoals de formule van Bovy, als de formules op basis van de hiaatacceptatietheorie. Een niet-lineair verkeersstroommodel, zoals de formule van Brilon, beschrijft de capaciteit minder goed voor hogere rotondeintensiteiten, vanwege de e-macht in de functie.
De capaciteit van een toerit met twee rotondestroken laat zich niet beschrijven door een lineair model, een model op basis van hiaatacceptatietheorie is hier wel geschikt voor. De formule van Brilon is niet geschikt gebleken voor toepassing op een turborotonde, vanwege het beschrijven van de gehele toerit in plaats van één toeritstrook.

De afgeronde resultaten van deze studie zijn nogmaals getoond in Tabel 7-1 en Tabel 7-2. Vanwege de ongeschiktheid van de formule van Brilon is deze niet weergegeven. Uit de resultaten blijkt dat de resultaten niet veel van elkaar verschillen. Goed te zien is dat door de hogere snelheid het kritisch hiaat (t_C) groter wordt, en dat de oprijvolgtijd (t_F) door een grotere hoek van invoegen kleiner wordt. Het bepalen van de minimale volgtijd (t_M) uit de data is zeer lastig gebleken. De methode van Hoogendoorn [15], waarbij het gemiddelde van de volgtijdverdeling voor geclusterde voertuigen wordt aangenomen als representatieve waarde voor de minimale volgtijd, bleek een te hoge waarde voor de minimale volgtijd te geven. Hierdoor is de waarde voor de minimale volgtijd, zoals hier getoond, een geschatte waarde waarvoor de berekende capaciteiten het best overeenkwamen met de gesimuleerde capaciteiten.

Het simulatiemodel VISSIM bleek geschikt voor het modelleren van rotondes. Op het schijnconflict na konden alle onderzochte onderdelen van het rijgedrag goed worden gekalibreerd. De kwaliteit en de kwantiteit van de data uit de praktijkwaarnemingen laat wel iets te wensen over, maar voor de data die beschikbaar is, komen de resultaten goed overeen. Het enige waar de simulatie nog te wensen over houdt is het simuleren van het schijnconflict. Hier is VISSIM zeker voor verbetering vatbaar.

Tabel 7-1: modelparameters enkelstrooksrotonde

Parameters Bovy			Parameters hiaatacceptatie		
Rotondediameter	37	50	Rotondediameter	37	50
C_0	1700	1850	t_C	3,1	3,4
a	0,91	0,95	t_F	2,1	1,9
b	0,20	0,00	t_M	1,9	1,9

Tabel 7-2: modelparameters standaard turborotonde

Parameters Bovy				Parameters hiaatacceptatie			
Type toerit	2 rot. str.	1 rot. str. Li	1 rot. str. Re	Type toerit	2 rot. str.	1 rot. str. Li	1 rot. str. Re
C_0	-	1800	1750	t_{C_binnen}	3,0		
a	-	0,95	0,94	t_{C_buiten}	3,2	2,9	3,0
b	-	0,00	0,00	t_F	2,0	2,0	2,0
				t_M	1,9	1,9	1,9

7.2 Aanbevelingen

Tijdens de studie is vooral gebleken dat er gebrek is aan bruikbare meetgegeven van rotondes in een capaciteitssituatie, waardoor de onderbouwing van de resultaten te wensen over laat. Vooral meetgegevens van turborotondes zal de onderbouwing van de resultaten sterker maken. De belangrijkste aanbeveling is dus het doen van aanvullende metingen op turborotondes in capaciteitsituaties.

De tweede aanbeveling is het aanpassen van VISSIM waardoor het schijnconflict beter gesimuleerd kan worden. De wijze waarop het in deze studie is gesimuleerd is een geïmproviseerde oplossing waarvan het maar de vraag is in hoeverre dit de werkelijkheid simuleert. Wanneer het schijnconflict op een realistischere manier kan worden gesimuleerd kan de werkelijke invloed van de middengeleider op het schijnconflict nader worden onderzocht. Dit is vooral nuttig omdat praktijkmetingen dan minder noodzakelijk worden. Turborotondes met een belasting op capaciteitsniveau zijn al zeer zeldzaam, waardoor voldoende bruikbare data van turborotondes met verschillende middengeleiderbreedtes zeer moeilijk te krijgen zal zijn.

8 Literatuur

1. Bovy, P.H., *Zusammenfassung des schweizerischen Kreiselhandbuchs.* Strasse und Verkehr, 1991. 3: p. 137, 138.
2. Brilon, W. and B. Stuwe, *Kreisverkehrsplätze - Leistungsfähigkeit, Sicherheit und verkehrstechnische Gestaltung.* Strassenverkehrstechnik, 1991. 6: p. 296-304.
3. Siegloch, W., *Ein Richtlinienvorschlag Zur Leistungsermittlung an Knotenpunkten Ohne Lichtsignalsteuerung (Capacity Calculations for Unsignalized Intersections).* Strassenverkehrstechnik, 1974. 1.
4. Tanner, J.C., *A theoretical analysis of delay at an uncontrolled intersection.* Biometrika, 1962. 49 (1-2).
5. Troutbeck, R.J., *Average Delay at an Unsignalized Intersection with Two Major Streams Each Having a Dichotomized Headway Distribution. .* Transportation Science, 1986. 20(4): p. 272-286.
6. Fisk, C.S., *Priority intersection capacity: A generalization of Tanner's formula.* Transportation Research, 1989. 23B(4).
7. Hagring, O., *Vehicle-vehicle Interactions at Roundabouts and their Implications for the Entry Capacity - A Methodological Study with Applications to Two-lane Roundabouts*, in *Dept. of Traffic Planning and Engineering*. 1998, Lund Institute of Technology: Lund.
8. Troutbeck, R.J. and W. Brilon, *Chapter 8: Unsignalized Intersection Theory*, in *Revised Traffic Flow Theory - A State-of-the-Art Report*. 2001.
9. Hegeman, G. and S.P. Hoogendoorn, *Simulation-based critical gab distribution estimation using Genetic Algorithms*, in *85th TRB Annual Meeting*. 2006: Washington D.C., USA.
10. Brilon, W., R. Koenig, and R.J. Troutbeck, *Useful Estimation procedures for Critical Gaps.* , in *Procedings of the Third International Symposium on Intersections Without Traffic Signals.* 1997: Portland, OR., USA.
11. Hoogendoorn, S.P., G. Hegeman, and T. Dijker, *Reader CT4821: Traffic Flow Theory and Simulation*, in *Transportation and Traffic Engineering Section, Faculty of Civil Engineering and Geosciences*. 2004, Delft University of Technology: Delft.
12. Cowan, R.J., *Useful headway models.* Transportation Research, 1975. 9(6).
13. Sullivan, D.P. and R.J. Troutbeck, *The use of Cowan's M3 headway distribution for modelling urban traffic flow.* Traffic Engineering & Control, 1994. 35(7-8).
14. Raff, M.S. and J.W. Hart, *A volume warrant for urban stop signs.* 1950.
15. Hoogendoorn, S.P., *Unified approach to estimating free speed distributions.* Transportation Research, 2005. Part B 39: p. 709-727.
16. Leeuw, A.M.d., *Capaciteit van rotondes - ontwikkeling van nieuwe rekenmodellen*, in *Vakgroep Infrastructuur, sectie Verkeeskunde*. 1997, Technische Universiteit Delft.
17. CROW, *Eenheid in rotondes.* Publicatie 126, 1998.
18. CROW, *ASVV - Aanbevelingen voor verkeersvoorzieningen binnen de bebouwde kom.* 2004.

Bijlage A

Deze bijlage bevat de resultaten van de afzonderlijke schatting van de parameters voor het analytisch model.

Inhoud

1. GEDETAILLEERDE RESULTATEN AFZONDERLIJKE SCHATTING 1

1.1 SCHIPLUIDEN 1

1.1.1 Kritisch hiaat (t_C) 1
1.1.2 Minimale volgtijd (t_M) 3
1.1.3 Oprijvolgtijd (t_F) 5

1.2 PAPENDRECHT 7

1.2.1 Kritisch hiaat (t_C) 7
1.2.2 Minimale volgtijd (t_M) 8
1.2.3 Oprijvolgtijd (t_F) 9

1.3 BERGSCHENHOEK 10

1.3.1 Kritisch hiaat (t_C) 10
1.3.2 Minimale volgtijd (t_M) 11
1.3.3 Oprijvolgtijd (t_F) 12

1.4 TURBOROTONDE ROTTERDAM 13

1.4.1 Kritisch hiaat (t_C) 13
1.4.2 Minimale volgtijd (t_M) 15
1.4.3 Oprijvolgtijd (t_F) 17

1.5 TURBOROTONDE REEUWIJK 18

1.5.1 Kritisch hiaat (t_C) 18
1.5.2 Minimale volgtijd (t_M) 21
1.5.3 Oprijvolgtijd (t_F) 23

1.6 SAMENVATTING RESULTATEN AFZONDERLIJKE SCHATTING 26

1 Gedetailleerde resultaten afzonderlijke schatting

In dit deel van bijlagen worden de schattingsresultaten van de parameters t_G, t_M en t_F gegeven. De resultaten worden weergegeven per rotonde.

1.1 Enkelstrooksrotonde Schipluiden

1.1.1 Kritisch hiaat (t_C)

De resultaten van de ML methode zijn weergegeven in Tabel 1 en Tabel 2. De bijbehorende verdelingen zijn getoond in Figuur 1.

Uit deze resultaten valt af te leiden dat de uitkomsten per meting flink verschillen. Er is goed te zien dat bij een groot aantal waarnemingen het domein van het 95% betrouwbaarheidsinterval redelijk klein is. Voor de meting van 29-10-2002 is met 95% zekerheid te stellen dat de afwijking minder is dan 0,16/2=0,08 [s]

De meting van 20-11-2001 heeft voor het bepalen van het kritisch hiaat zes waarnemingen opgeleverd. De uitkomst van deze berekening is daardoor, met een domein van het 95% betrouwbaarheidsinterval van 1,32 [s], niet betrouwbaar.
Tijdens de meting van 18-10-2002 viel er af en toe neerslag, hierdoor zal het wegdek gedurende het grootste deel van de meting nat zijn geweest. Dit kan van invloed zijn op het kritisch hiaat. De resultaten van de meting van 29-10-2002 worden aangenomen als meest betrouwbaar vanwege het grote aantal waarnemingen en de gunstige weersomstandigheden.

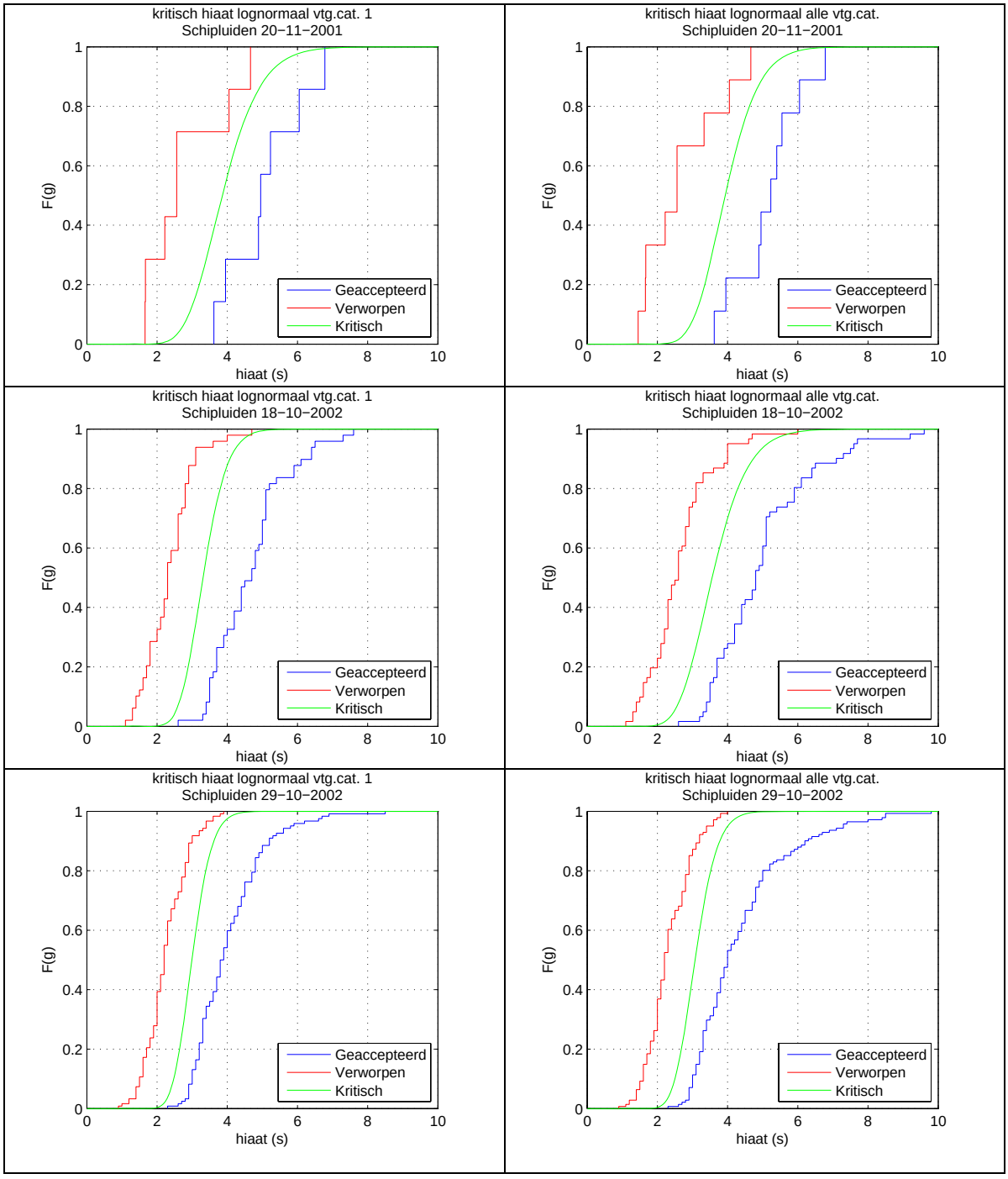
Tabel 1: Kritisch hiaat t_C, alleen voertuigcategorie 1

Meting	aant. waarn.	μ	σ^2	95% betrouwbaarheid interval [s]
20-11-2001	7	4,0	0,79	1,32
18-10-2002	49	3,4	0,30	0,31
29-10-2002	122	3,0	0,20	0,16

Tabel 2: Kritisch hiaat t_C, alle voertuigcategorieën

Meting	aant. waarn.	μ	σ^2	95% betrouwbaarheid interval [s]
20-11-2001	9	4,0	0,60	1,01
18-10-2002	61	3,6	0,67	0,41
29-10-2002	141	3,1	0,25	0,17

Het kritisch hiaat is ook bepaald voor de aanname dat het kritisch hiaat normaal verdeeld is in plaats van lognormaal. Hieruit bleek dat voor een normaal verdeling het resultaat van de door Matlab gebruikte objectfunctie, structureel hoger uit viel dan voor een lognormaal verdeling. In de rest van deze studie worden alleen de resultaten van een lognormale verdeling vermeld.



Figuur 1: Kritisch hiaat verdelingen Schipluiden

1.1.2 Minimale volgtijd (t_M)

De volgtijdverdelingen die resulteren uit de metingen zijn weergegeven in Figuur 3. Te zien is dat de hoeveelheid rotondeverkeer een grote invloed heeft op de verdeling van de volgtijden. Weinig rotondeverkeer, zoals bij de meting van 20-11-2001, resulteert in een bijna uniforme verdeling, terwijl veel rotondeverkeer, zoals bij de meting van 29-10-2002, resulteert in een piek bij twee seconden met exponentiele staart naar rechts.

Voor het bepalen van de minimale volgtijd is data nodig in de vorm van de meting van 29-10-2002. De overige meetresultaten zijn niet bruikbaar voor het bepalen van de minimale volgtijd.

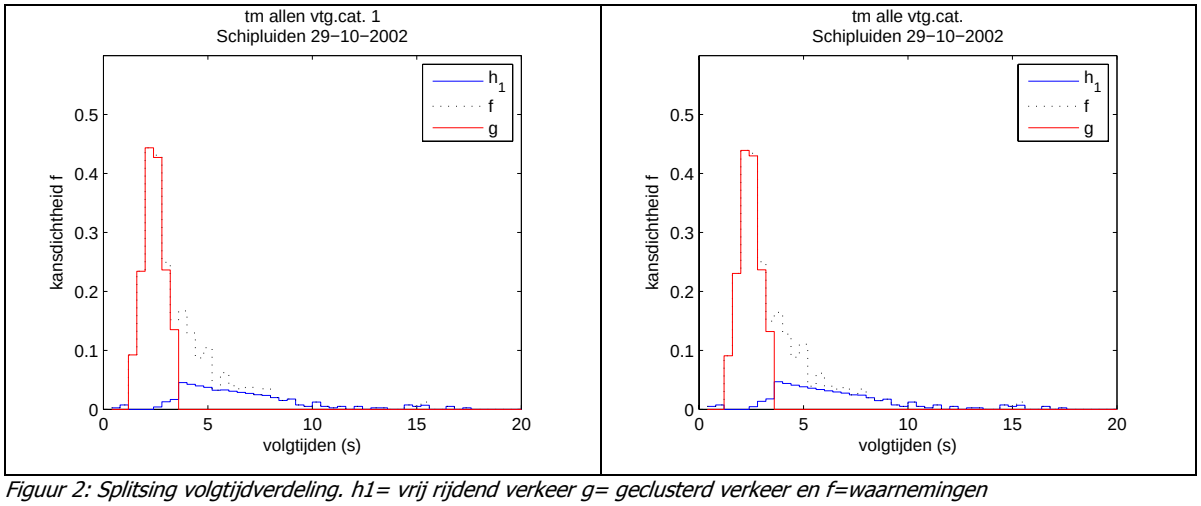
In Figuur 2 is de splitsing te zien van de volgtijdverdeling in een verdeling voor het geclusterde verkeer en een verdeling voor het vrij rijdende verkeer. Het gemiddelde van de verdeling voor het geclusterde verkeer is weergegeven in Tabel 3 en Tabel 4.

Tabel 3: Minimale volgtijd t_M, alleen voertuigcategorie 1

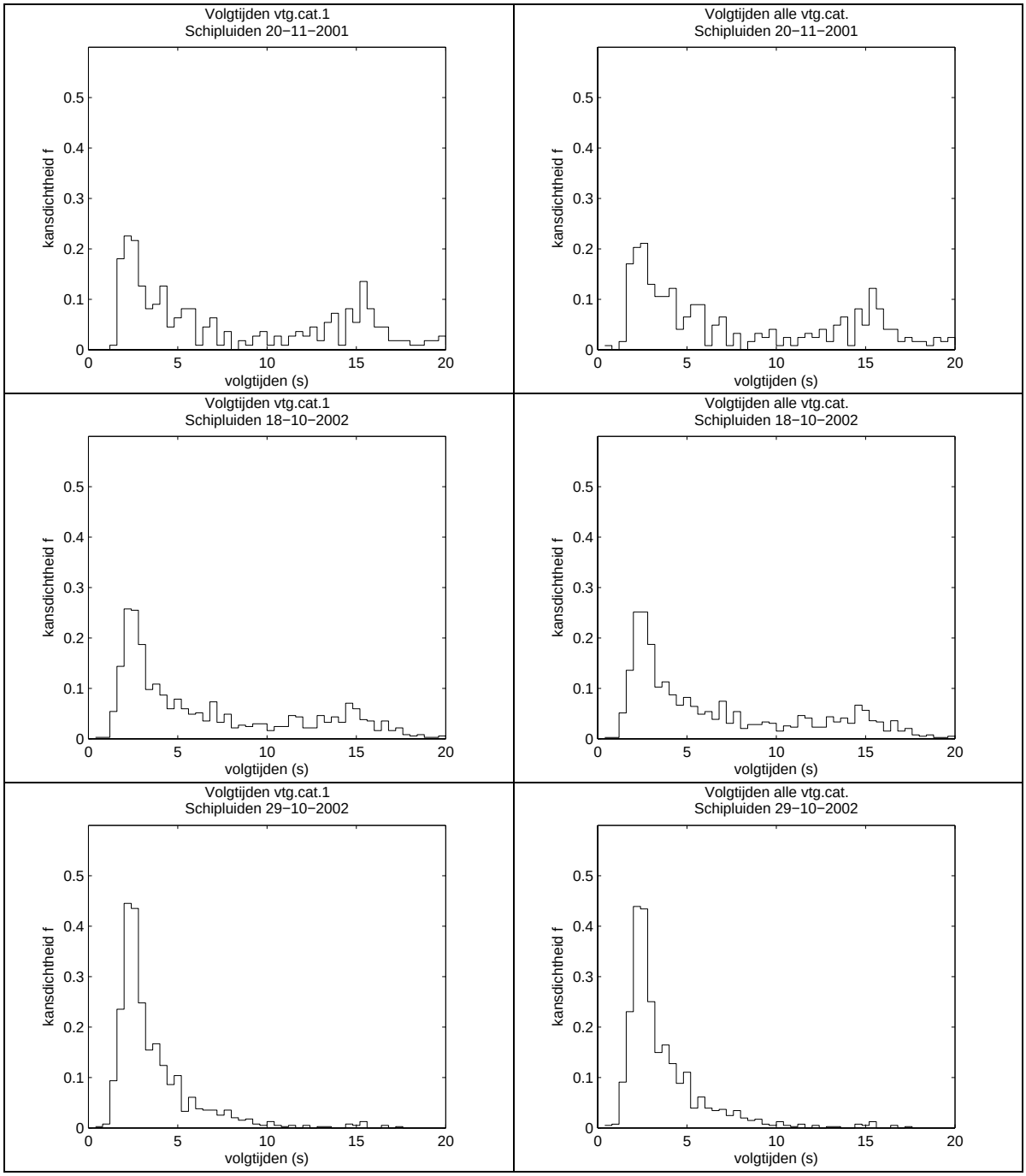
Meting	aant. waarn.	μ	σ^2	95% betrouwbaarheid interval [s]
29-10-2002	215	2,2	0,52	0,19

Tabel 4: Minimale volgtijd t_M, alle voertuigcategorieën

Meting	aant. waarn.	μ	σ^2	95% betrouwbaarheid interval [s]
29-10-2002	226	2,2	0,52	0,19



Figuur 2: Splitsing volgtijdverdeling. h1= vrij rijdend verkeer g= geclusterd verkeer en f=waarnemingen



Figuur 3: Volgtijdverdelingen Schipluiden

1.1.3 Oprijvolgtijd (t_F)

De oprijvolgtijdverdelingen die resulteren uit de metingen zijn weergegeven in Figuur 4. Te zien is dat wanneer er sprake is van veel rotondeverkeer, zoals bij de meting van 29-10-2002, er weinig waarnemingen zijn van voertuigen die gezamenlijk gebruik maken van een aangeboden hiaat. Dit hoeft echter geen afwijkende resultaten te geven.

De waarden voor de oprijvolgtijd zijn weergegeven in Tabel 5 en Tabel 6.

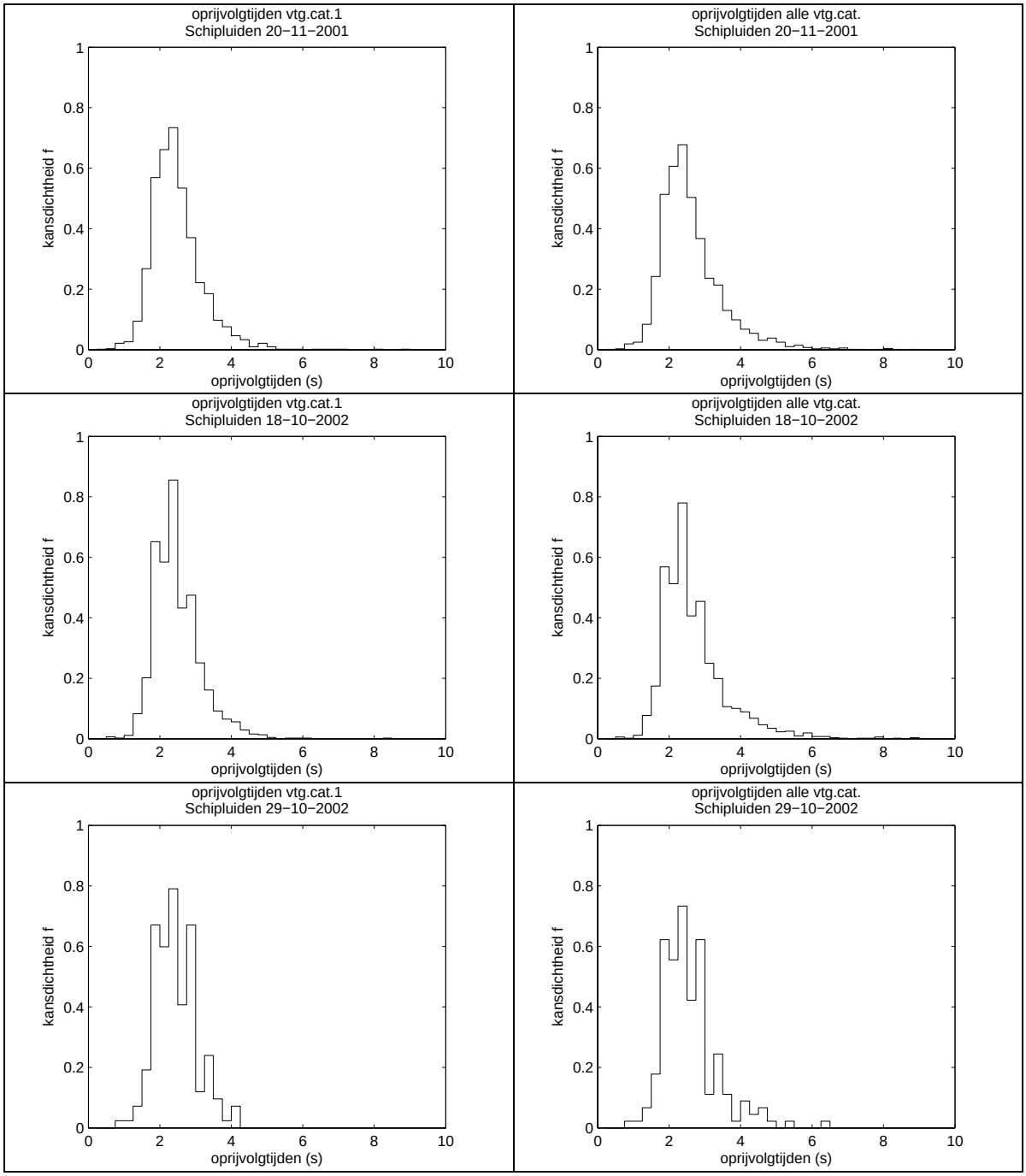
Aan de hand van deze waarden is te zien dat de uitkomsten voor de verschillende metingen redelijk constant zijn.

Tabel 5: Oprijvolgtijd t_F, alleen voertuigcategorie 1

Meting	aant. waarn.	mediaan	μ	σ^2	95% betrouwbaarheid interval [s]
20-11-2001	2423	2,1	2,2	1,34	0,09
18-10-2002	1786	2,1	2,2	0,66	0,08
29-10-2002	167	2,1	2,2	0,58	0,23

Tabel 6: Oprijvolgtijd t_F, alle voertuigcategorieën

Meting	aant. waarn.	mediaan	μ	σ^2	95% betrouwbaarheid interval [s]
20-11-2001	2718	2,2	2,5	2,61	0,12
18-10-2002	2068	2,2	2,4	0,93	0,08
29-10-2002	180	2,2	2,3	0,78	0,26



Figuur 4: Oprijvolgtijdverdelingen te Schipluiden

1.2 Enkelstrooksrotonde Papendrecht

De weersomstandigheden gedurende de meting in Papendrecht waren niet optimaal en er was sprake van weinig rotondeverkeer en veel toeritverkeer. Dit is terug te zien in de data. Onderstaand zullen de verschillende parameters worden behandeld.

1.2.1 Kritisch hiaat (t_C)

De resultaten van de ML methoden zijn weergegeven in Tabel 7 en Tabel 8.
De figuren die horen bij deze berekeningen zijn getoond in Figuur 5.

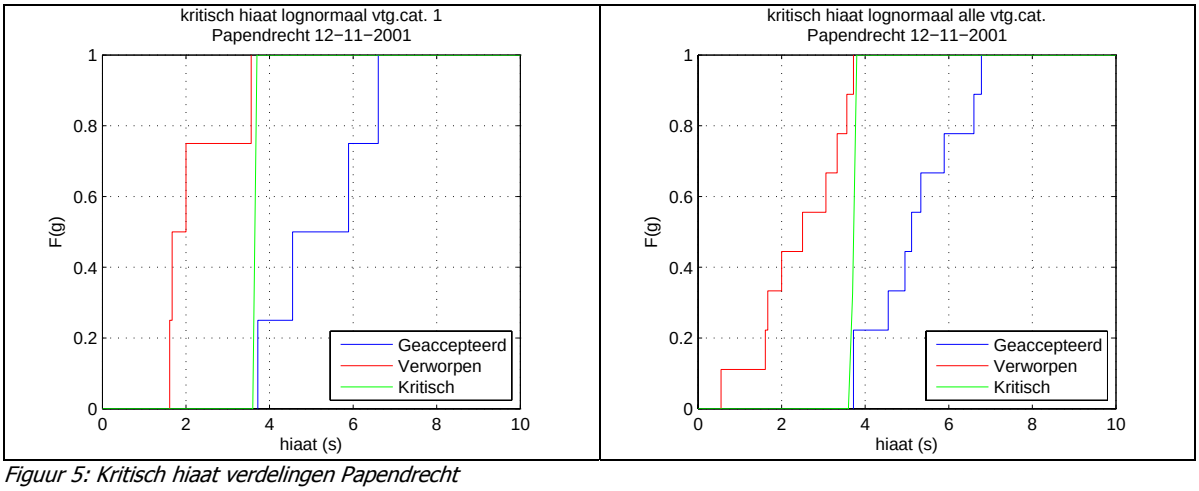
Uit deze waarden valt af te leiden dat de uitkomsten zeer onbetrouwbaar zijn en bijna een seconde(!) hoger liggen dan de uitkomsten van Schipluiden. Dit komt door de zeer slechte kwaliteit van de data, zoals te zien is aan het aantal waarnemingen. Deze lage hoeveelheid is de oorzaak van de geringe hoeveelheid rotondeverkeer en waarschijnlijk het slechte weer.
Dit heeft tot gevolg dat het domein van het 95% betrouwbaarheidsinterval zeer hoog is. Hieruit volgt dat op basis van deze data kan geen representatief kritisch hiaat kan worden bepaald.

Tabel 7: Kritisch hiaat t_C, alleen voertuigcategorie 1

Meting	aant. waarn.	μ	σ^2	95% betrouwbaarheid interval [s]
12-11-2001	4	3,6	0,00	0,00

Tabel 8: Kritisch hiaat t_C, alle voertuigcategorieën

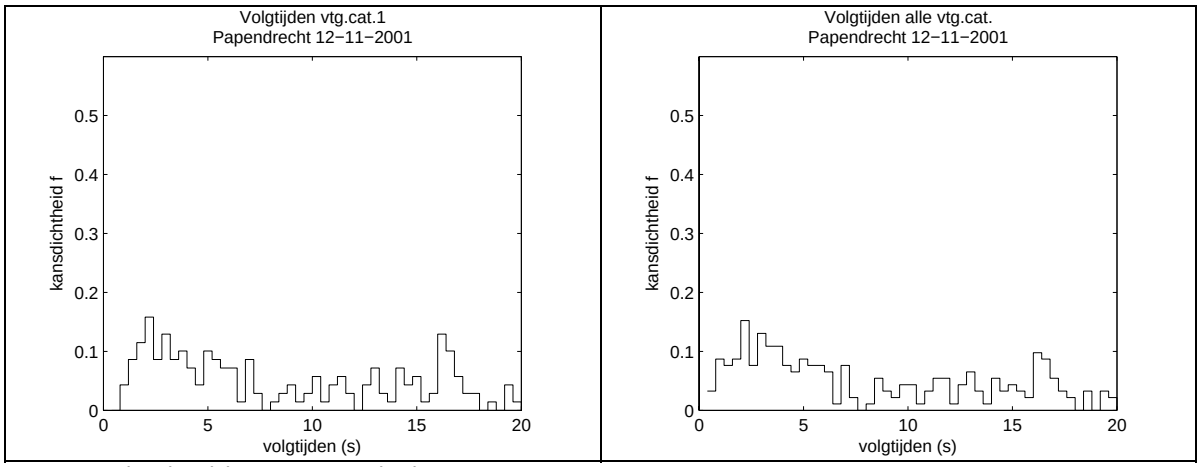
Meting	aant. waarn.	μ	σ^2	95% betrouwbaarheid interval [s]
12-11-2001	9	3,7	0,00	0,00



Figuur 5: Kritisch hiaat verdelingen Papendrecht

1.2.2 Minimale volgtijd (t_M)

De resultaten van de meting zijn verwerkt in Figuur 6. Uit deze grafiek valt te concluderen dat aan de hand van deze data de minimale volgtijd niet te bepalen is. Dit is te wijten aan de geringe hoeveelheid rotondeverkeer.



Figuur 6: Volgtijdverdelingen te Papendrecht

1.2.3 Oprijvolgtijd (t_F)

De resultaten van de metingen zijn verwerkt in Figuur 7. De waarden van de oprijvolgtijden zijn weergegeven in Tabel 9 en Tabel 10.

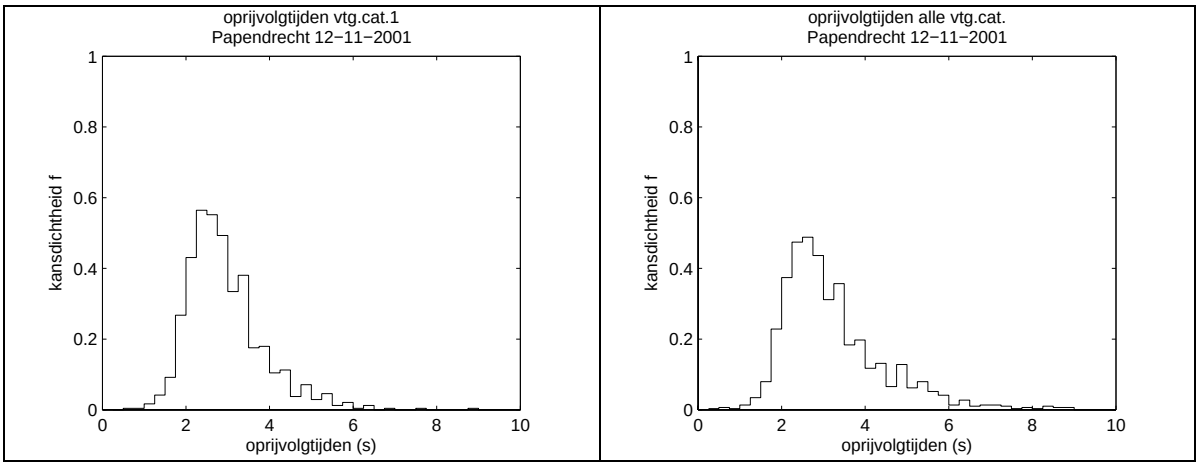
Uit deze resultaten valt te concluderen dat de oprijvolgtijd en de spreiding een stuk hoger liggen dan bij Schipluiden (2,1s en 0,66s). Dit is waarschijnlijk het gevolg van de mistige weersomstandigheden. Hierdoor zullen automobilisten voorzichtiger rijden en minder dicht op hun voorganger invoegen.
Geconcludeerd kan worden dat deze data niet geschikt is voor het bepalen van een representatieve oprijvolgtijd.

Tabel 9: Oprijvolgtijd t_F, alleen voertuigcategorie 1

Meting	aant. waarn.	mediaan	μ	σ^2	95% betrouwbaarheid interval [s]
12-11-2001	962	2,5	3,4	13,85	0,47

Tabel 10: Oprijvolgtijd t_F, alle voertuigcategorieën

Meting	aant. waarn.	mediaan	μ	σ^2	95% betrouwbaarheid interval [s]
12-11-2001	1164	2,7	3,6	12,97	0,41



Figuur 7: Histogram met oprijvolgtijden te Papendrecht

1.3 Enkelstrooksrotonde Bergschenhoek

De weersomstandigheden gedurende de meting in Bergschenhoek waren goed en er was sprake van veel rotonde- en toeritverkeer.

1.3.1 Kritisch hiaat (t_C)

De resultaten van de ML methoden zijn weergegeven in Tabel 11 en Tabel 12.
De figuren die horen bij deze berekeningen zijn getoond in Figuur 8.

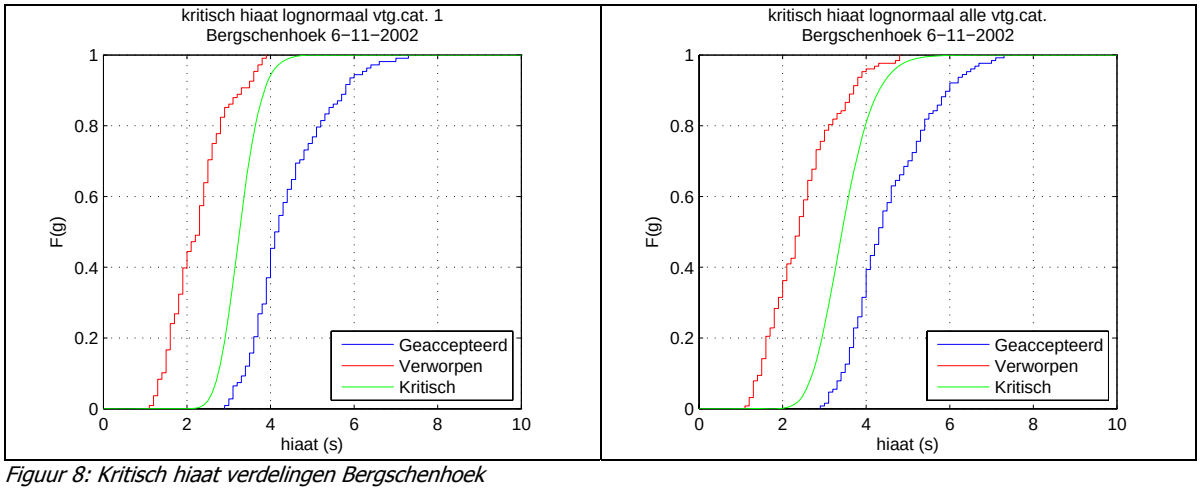
De resultaten van deze meting liggen iets (ongeveer 0,3 seconden) hoger dan die van Schipluiden. Er zijn voldoende waarnemingen beschikbaar en het domein van het 95% betrouwbaarheidsinterval is redelijk klein. Dit geeft aan dat de kwaliteit van de data goed is. Een verklaring van het hogere kritisch hiaat kan gezocht worden in de grotere rotondediameter (50m) ten opzichte van de rotonde in Schipluiden (37,8m). Waarschijnlijk is de snelheid van de voertuigen op de rotonde hier iets hoger waardoor het kritisch hiaat groter wordt.

Tabel 11: Kritisch hiaat t_C, alleen voertuigcategorie 1

Meting	aant. waarn.	μ	σ^2	95% betrouwbaarheid interval [s]
6-11-2002	108	3,3	0,19	0,16

Tabel 12: Kritisch hiaat t_C, alle voertuigcategorieën

Meting	aant. waarn.	μ	σ^2	95% betrouwbaarheid interval [s]
6-11-2002	127	3,5	0,40	0,22



Figuur 8: Kritisch hiaat verdelingen Bergschenhoek

1.3.2 Minimale volgtijd (t_M)

De resultaten van de meting zijn verwerkt in Figuur 9.

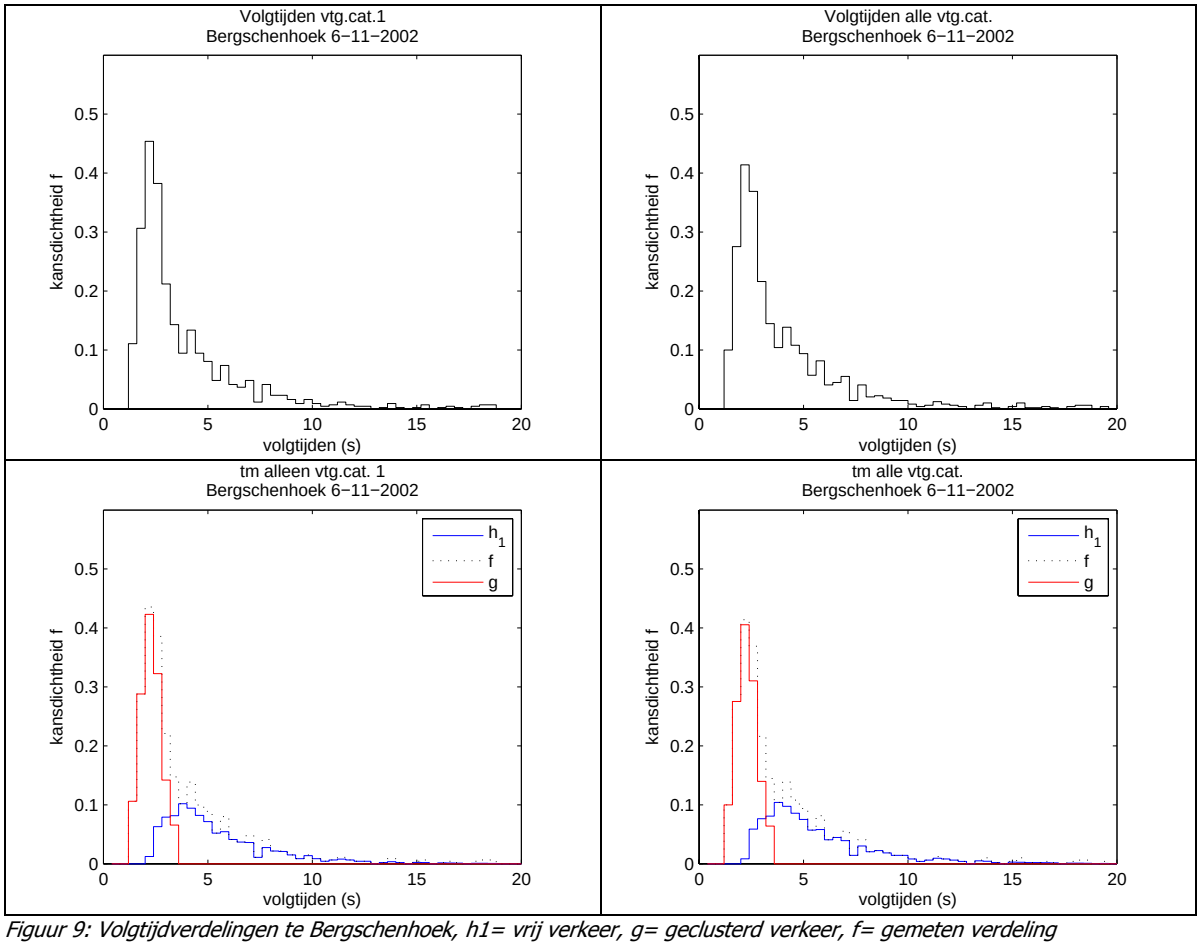
Als gevolg van de grote hoeveelheid rotondeverkeer zijn de volgtijden goed verdeeld. Deze data is geschikt voor het bepalen van de minimale volgtijd op de rotonde. In de onderste grafieken is de splitsing van de volgtijdverdeling getoond. Het gemiddelde van de verdeling van het geclusterde verkeer is weergegeven in Tabel 13 en Tabel 14.

Tabel 13: Minimale volgtijd t_M, alleen voertuigcategorie 1

Meting	aant. waarn.	μ	σ^2	95% betrouwbaarheid interval [s]
6-11-2002	456	2,1	0,50	0,13

Tabel 14: Minimale volgtijd t_M, alle voertuigcategorieën

Meting	aant. waarn.	μ	σ^2	95% betrouwbaarheid interval [s]
6-11-2002	509	2,1	0,50	0,12



Figuur 9: Volgtijdverdelingen te Bergschenhoek, h1= vrij verkeer, g= geclusterd verkeer, f= gemeten verdeling

1.3.3 Oprijvolgtijd (t_F)

Het resultaat van de metingen is verwerkt in Figuur 10. De waarde van de oprijvolgtijden zijn weergegeven in Tabel 15 en Tabel 16.

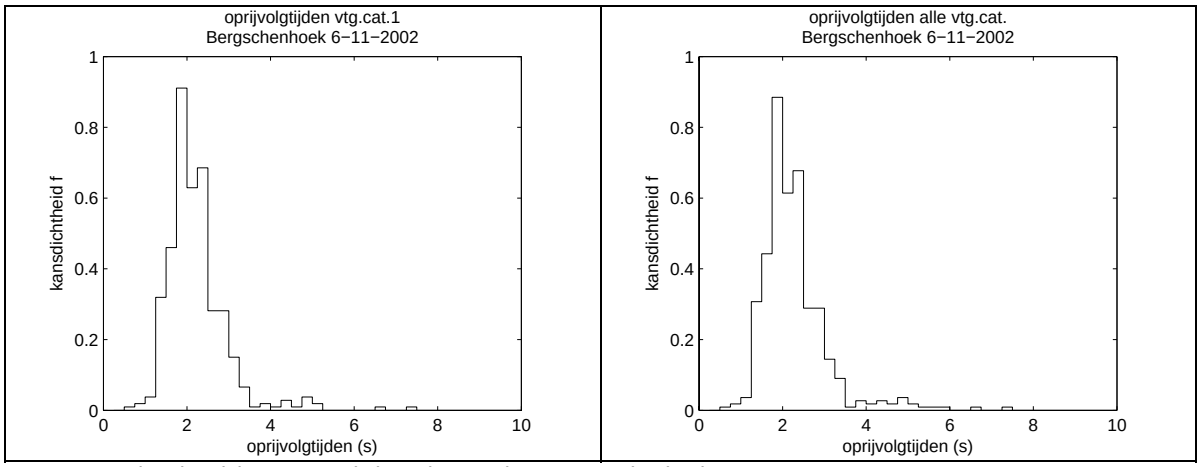
Tabel 15: Oprijvolgtijd t_F, alleen voertuigcategorie 1

Meting	aant. waarn.	mediaan	μ	σ^2	95% betrouwbaarheid interval [s]
6-11-2002	426	1,8	1,94	0,73	0,16

Tabel 16: Oprijvolgtijd t_F, alle voertuigcategorieën

Meting	aant. waarn.	mediaan	μ	σ^2	95% betrouwbaarheid interval [s]
6-11-2002	443	1,8	2,0	0,79	0,17

Uit deze resultaten valt te concluderen dat de oprijvolgtijd iets lager ligt dan bij Schipluiden (2,1s). Dit zou verklaard kunnen worden door de kleinere hoek waaronder het verkeer moet invoegen ten opzichte van de rotonde van Schipluiden. Deze kleinere hoek is het gevolg van de grotere rotondediameter van de rotonde in Bergschenhoek.



Figuur 10: Volgtijdverdelingen op enkelstrooksrotonde van Bergschenhoek

1.4 Turborotonde Rotterdam

De weersomstandigheden gedurende de meting waren goed en er was sprake van redelijk veel rotondeverkeer en redelijk veel toeritverkeer.

1.4.1 Kritisch hiaat (t_C)

De resultaten van de ML methoden zijn weergegeven in Tabel 17 en Tabel 18.
De figuren die horen bij deze berekeningen zijn getoond in Figuur 11 en Figuur 12.

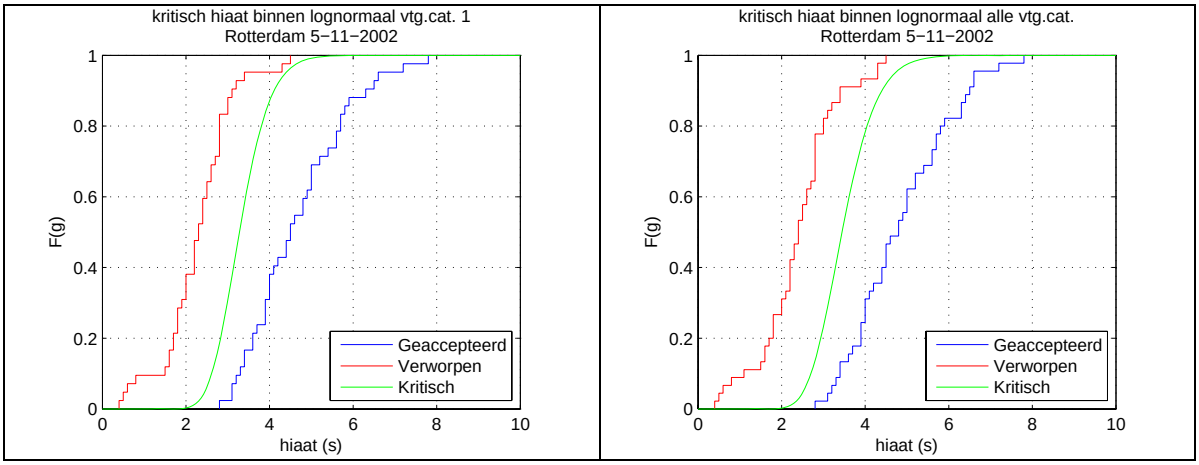
Het aantal waarnemingen is enigszins laag om het kritisch hiaat met voldoende zekerheid vast te stellen. Het domein van de betrouwbaarheidsintervallen zijn voor de resultaten van de gezamenlijke data niet zo klein als bij Schipluiden en Bergschenhoek, maar niet extreem groot zoals bij Papendrecht. De resultaten worden gezien als redelijk betrouwbaar.

Tabel 17: Kritisch hiaat t_C, alleen voertuigcategorie 1

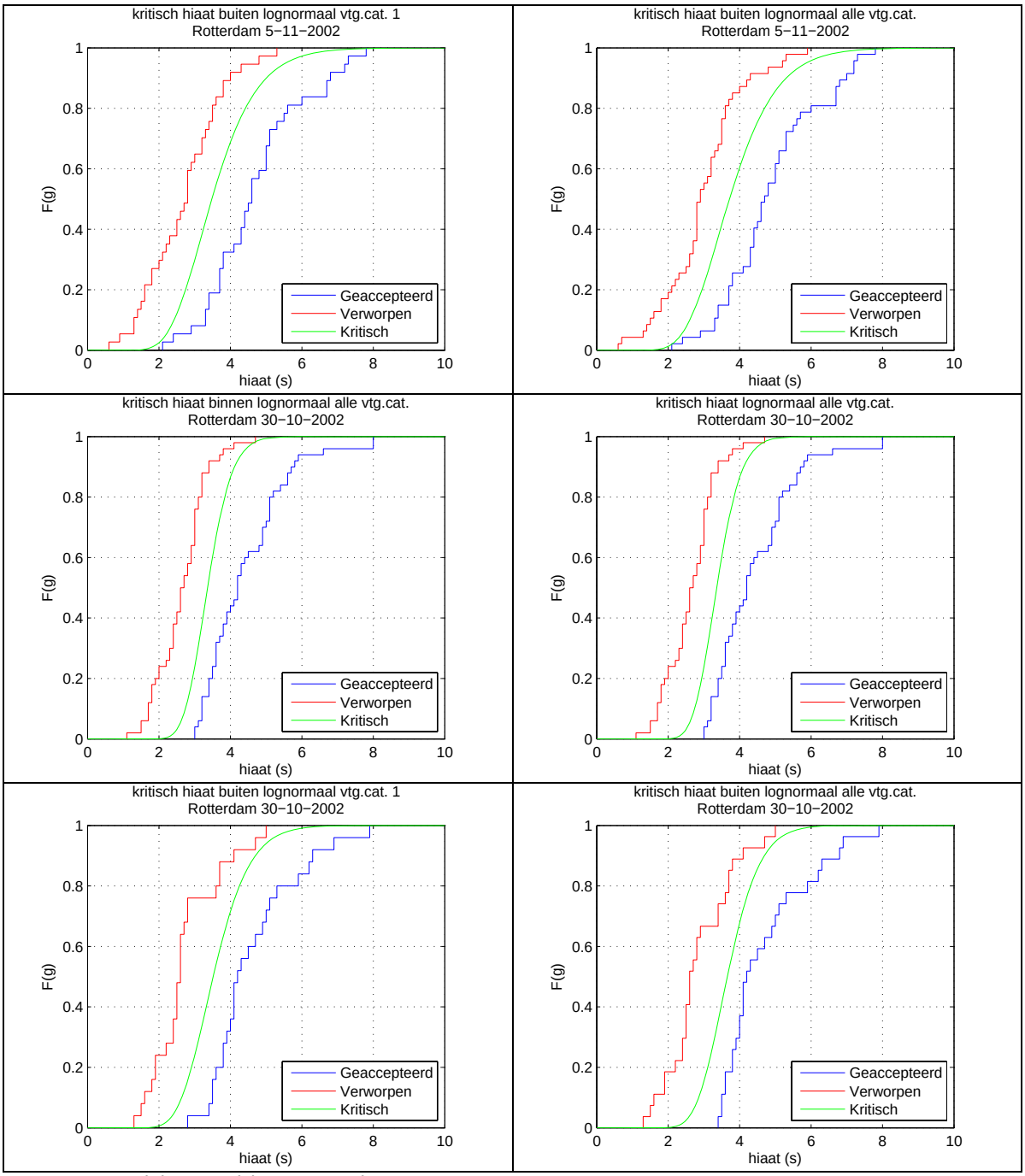
Meting	aant. waarn.	μ	σ^2	95% betrouwbaarheid interval [s]
5-11-2002 binnen	42	3,3	0,35	0,36
5-11-2002 buiten	37	3,6	1,09	0,67
30-10-2002 binnen	39	3,3	0,11	0,21
30-10-2002 buiten	25	3,6	0,68	0,65
Gezamenlijk binnen	81	3,3	0,23	0,21
Gezamenlijk buiten	62	3,6	0,92	0,48

Tabel 18: Kritisch hiaat t_C, alle voertuigcategorieën

Meting	aant. waarn.	μ	σ^2	95% betrouwbaarheid interval [s]
5-11-2002 binnen	45	3,5	0,45	0,39
5-11-2002 buiten	47	3,9	1,19	0,62
30-10-2002 binnen	50	3,4	0,30	0,30
30-10-2002 buiten	27	3,7	0,53	0,55
Gezamenlijk binnen	95	3,4	0,37	0,24
Gezamenlijk buiten	74	3,8	0,96	0,45



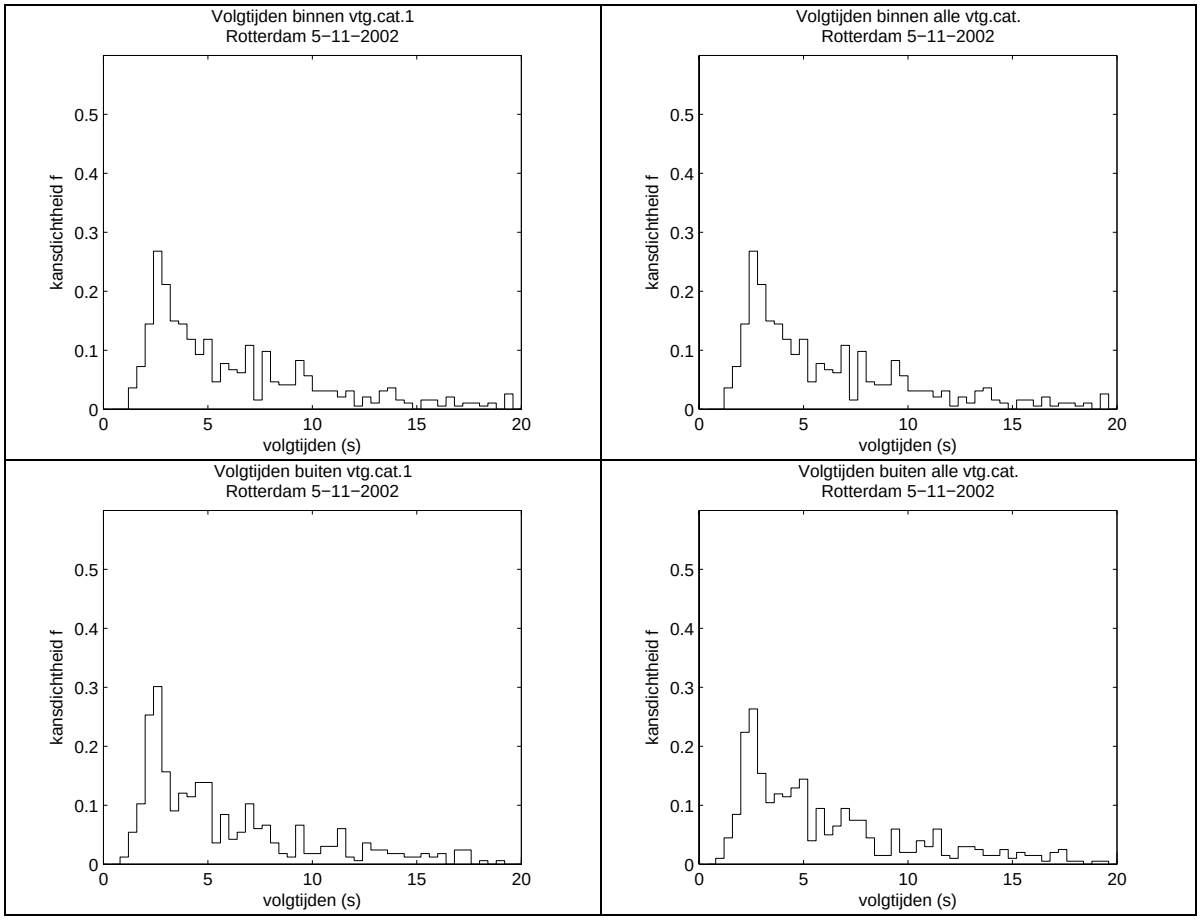
Figuur 11: Kritisch hiaat verdelingen Rotterdam



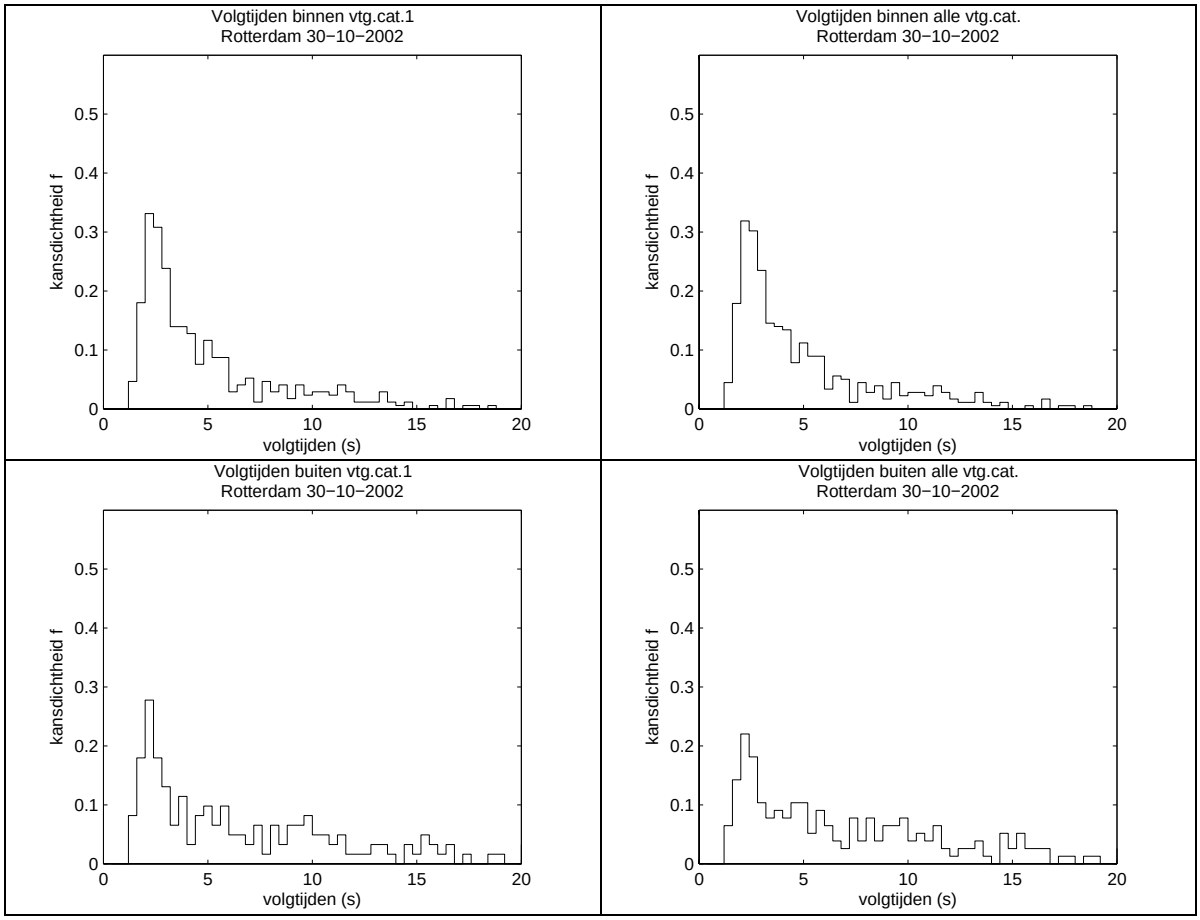
Figuur 12: Kritisch hiaat verdelingen Rotterdam

1.4.2 Minimale volgtijd (t_M)

De resultaten van de meting zijn weergegeven in Figuur 13 en Figuur 14 op de volgende pagina.
Uit de figuren valt te concluderen dat de gevonden verdelingen niet geschikt zijn om de minimale volgtijd te bepalen.



Figuur 13: Volgtijdverdelingen te turborotonde Rotterdam



Figuur 14: Volgtijdverdelingen te turborotonde Rotterdam

1.4.3 Oprijvolgtijd (t_F)

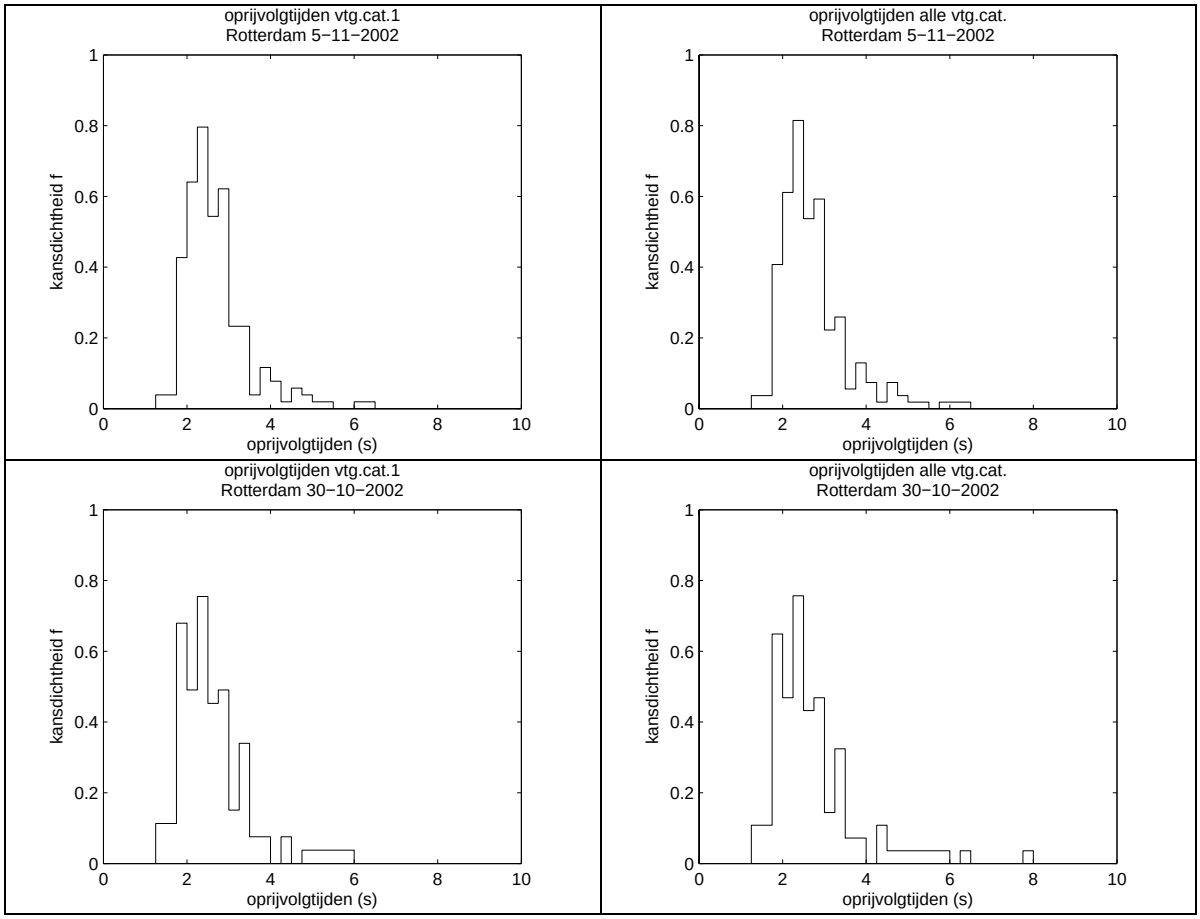
De resultaten van de metingen zijn weergegeven in Figuur 15. De waarden van de oprijvolgtijd zijn weergegeven in Tabel 19 en Tabel 20.
Deze resultaten zijn iets hoger dan die van Schipluiden (2,1 s). Dit kan verklaard worden door de extra voorzichtigheid van de automobilisten, één rijstrook oversteken is makkelijker dan twee.

Tabel 19: Oprijvolgtijd t_F, alleen voertuigcategorie 1

Meting	aant. waarn.	mediaan	μ	σ^2	95% betrouwbaarheid interval [s]
5-11-2002	206	2,3	2,4	0,77	0,24
30-10-2002	106	2,2	2,4	0,86	0,35
Gezamenlijk	312	2,2	2,4	0,80	0,20

Tabel 20: Oprijvolgtijd t_F, alle voertuigcategorieën

Meting	aant. waarn.	mediaan	μ	σ^2	95% betrouwbaarheid interval [s]
5-11-2002	216	2,3	2,5	0,81	0,24
30-10-2002	111	2,2	2,5	1,06	0,38
Gezamenlijk	327	2,3	2,5	0,90	0,21



Figuur 15: Histogram met oprijvolgtijden te turborotonde Rotterdam

1.5 Turborotonde Reeuwijk

De weersomstandigheden gedurende de meting waren goed en er was sprake van redelijk veel rotonde- en toeritverkeer. Wat opviel aan het aankomstpatroon van de voertuigen was dat deze aankwamen in groepjes en niet als een constante stroom. Hierdoor valt te twijfelen aan de aanname dat de aankomst van de voertuigen beschreven kan worden als een Poisson-proces. Dit kan tot gevolg hebben dat de waarde van φ afwijkende resultaten oplevert. De overige parameters kunnen wel bepaald worden. Verder was er geen sprake van een constante wachtrij op de toerit wat tot gevolg kan hebben dat de uitkomsten iets hoger liggen dan bij de andere rotondes. De hoeveelheid verkeer was op 19-6-2002 een stuk lager dan op de andere dagen. Hierdoor zullen de t_F, t_M en t_C waarschijnlijk hoger uitvallen dan bij de overige rotondes, omdat het verkeer meer tijd kan nemen voor de handelingen.

1.5.1 Kritisch hiaat (t_C)

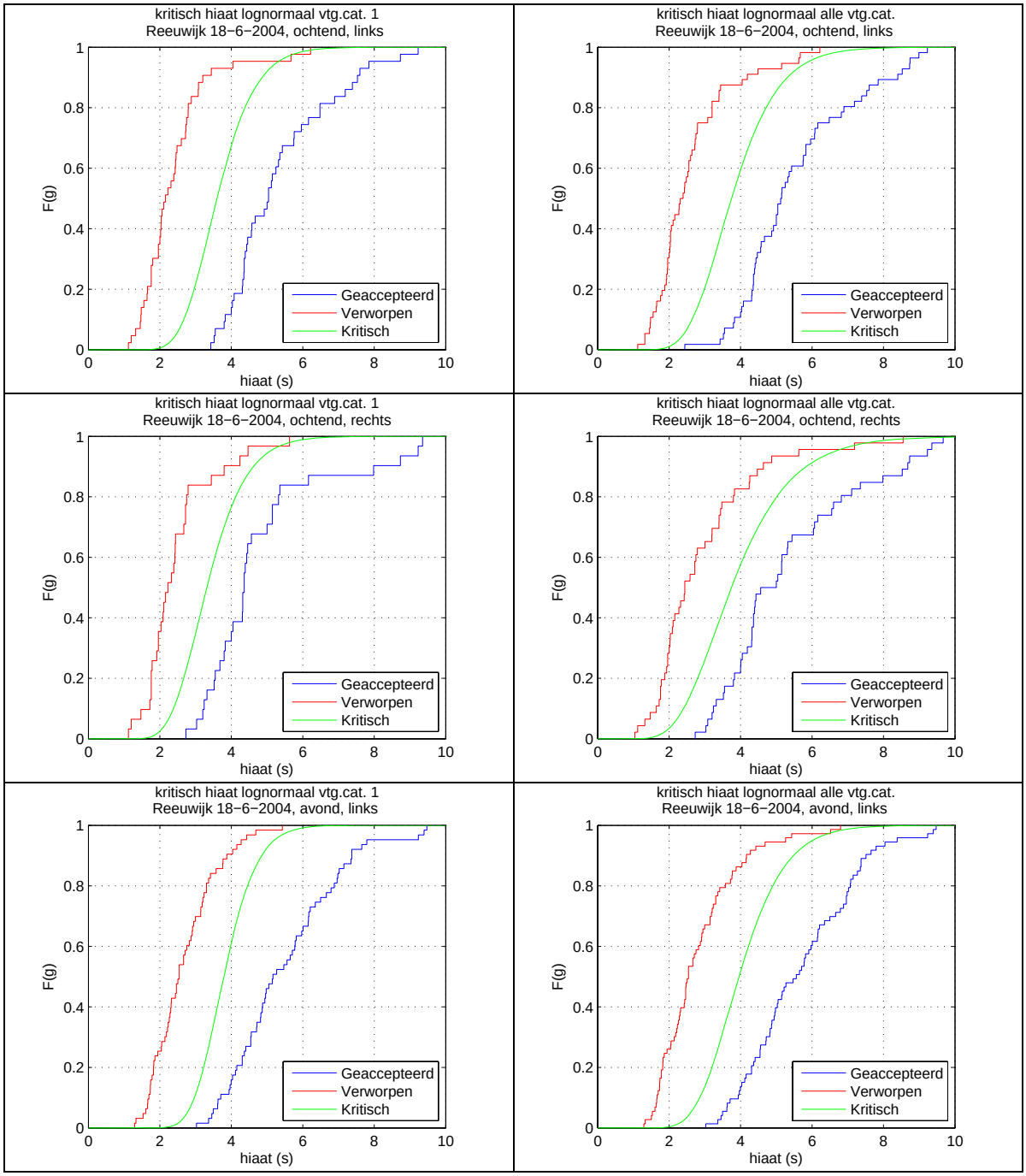
De resultaten van de ML methoden zijn getoond in Tabel 21 en Tabel 22.
De figuren die horen bij de berekeningen zijn weergegeven in Figuur 16 en Figuur 17.

Tabel 21: Kritisch hiaat t_C, alleen voertuigcategorie 1

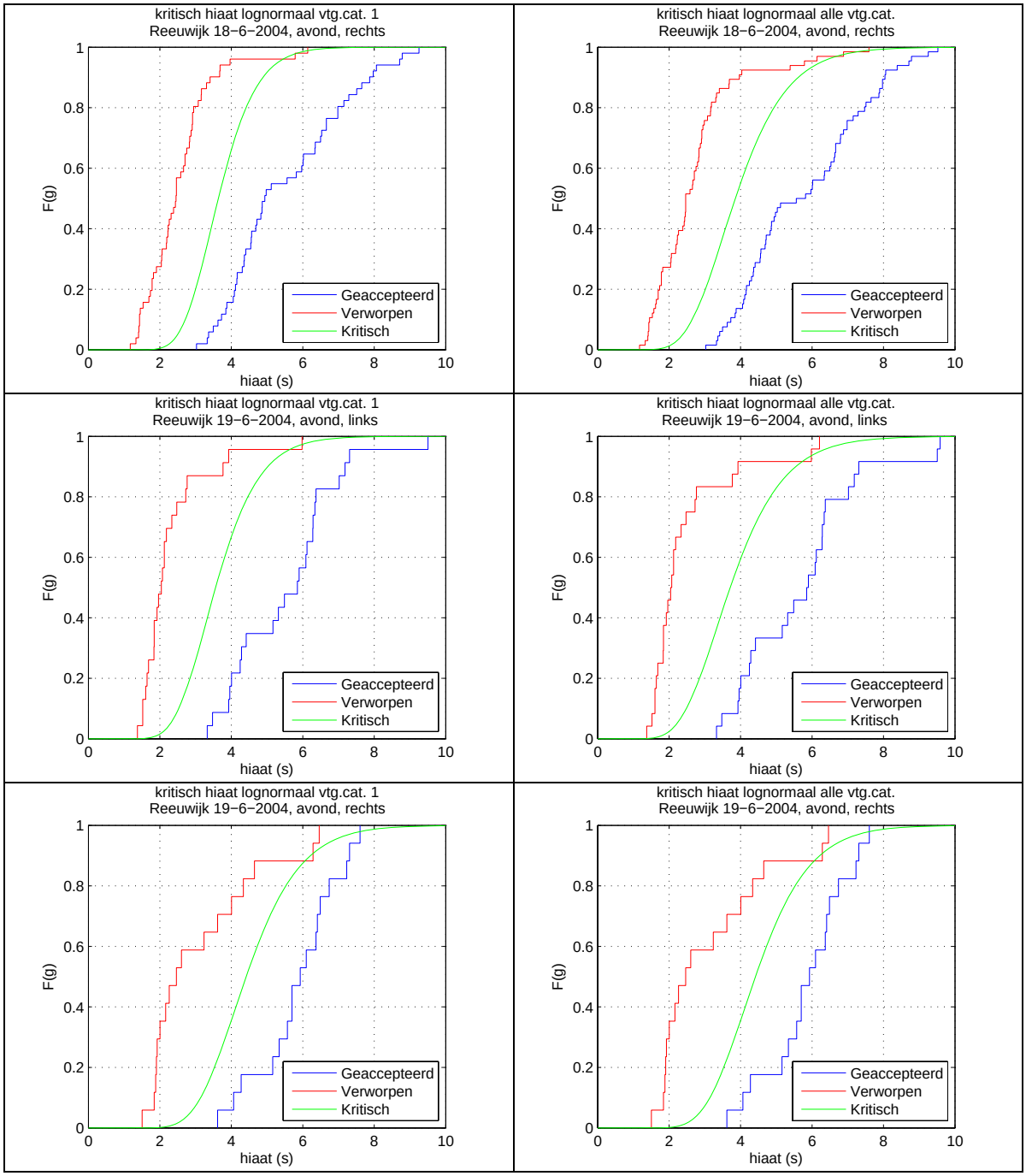
Meting	aant. waarn.	μ	σ^2	95% betrouwbaarheid interval [s]
18-6-2002 ochtend links	43	3,7	0,77	0,52
18-6-2002 ochtend rechts	31	3,4	0,81	0,63
18-6-2002 avond links	63	3,9	0,56	0,37
18-6-2002 avond rechts	51	3,7	0,76	0,48
19-6-2002 avond links	23	3,7	1,01	0,82
19-6-2002 avond rechts	17	4,6	1,54	1,18
Gezamenlijk links	106	3,8	0,65	0,31
Gezamenlijk rechts	82	3,6	0,80	0,39

Tabel 22: Kritisch hiaat t_C, alle voertuigcategorieën

Meting	aant. waarn.	μ	σ^2	95% betrouwbaarheid interval [s]
18-6-2002 ochtend links	56	3,9	1,16	0,56
18-6-2002 ochtend rechts	46	4,0	2,01	0,82
18-6-2002 avond links	73	4,1	1,11	0,48
18-6-2002 avond rechts	66	4,0	1,45	0,58
19-6-2002 avond links	24	3,9	1,57	1,00
19-6-2002 avond rechts	17	4,6	1,54	1,18
Gezamenlijk links	129	4,0	1,14	0,37
Gezamenlijk rechts	112	4,0	1,70	0,48



Figuur 16: Kritisch hiaat verdelingen Reeuwijk



Figuur 17: Kritisch hiaat verdelingen Reeuwijk

1.5.2 Minimale volgtijd (t_M)

De volgtijdverdelingen die resulteren uit de metingen zijn weergegeven in Figuur 19.

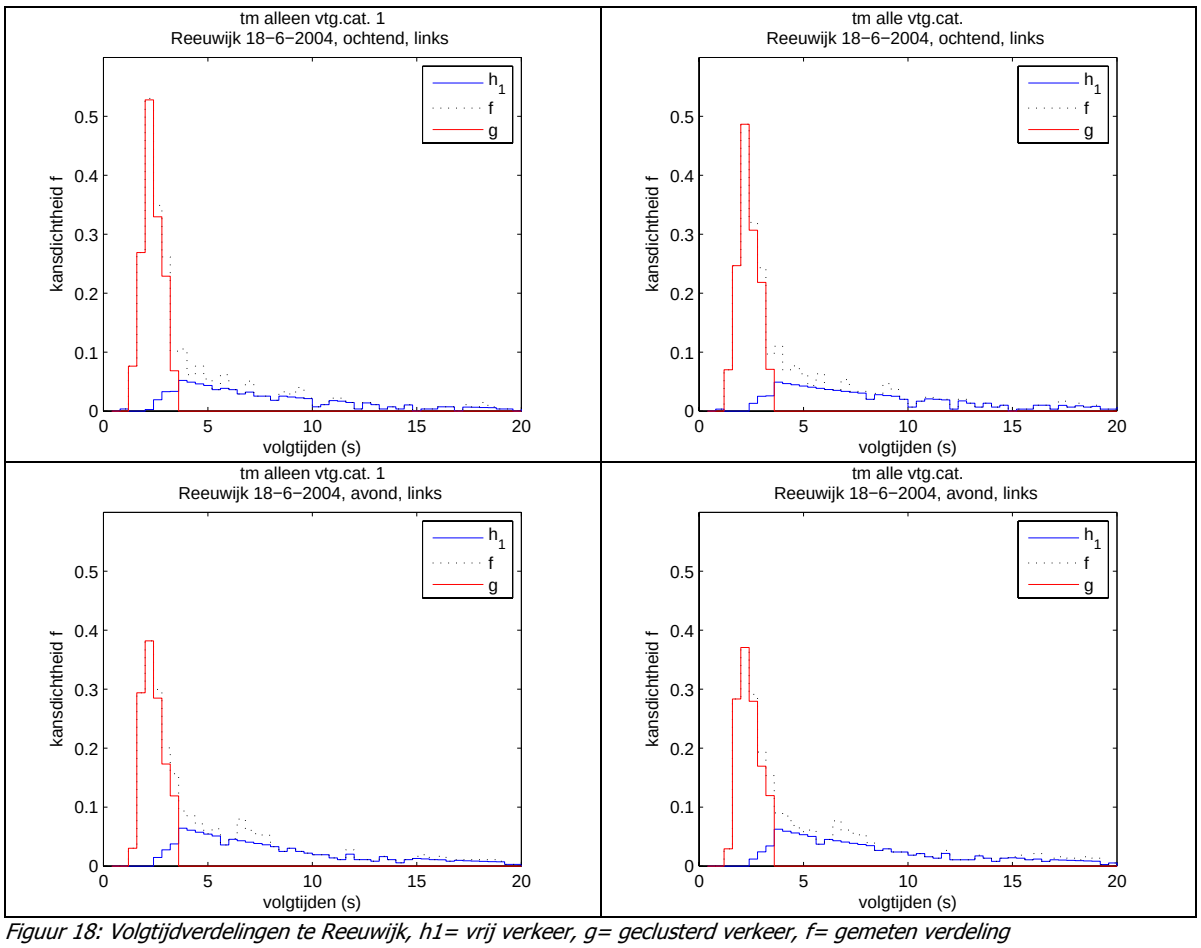
Als gevolg van de grote hoeveelheid rotondeverkeer zijn de volgtijden van 18-6-ochtend en 18-6-avond goed verdeeld. Deze data is geschikt voor het bepalen van de minimale volgtijd op de rotonde. De data van 19-6-avond is niet geschikt. In Figuur 18 is de splitsing van de volgtijdverdeling weergegeven. Het gemiddelde van de verdeling van het geclusterde verkeer is weergegeven in Tabel 23 en Tabel 24. Naast een bepaling van t_M voor de twee afzonderlijke metingen is ook een waarde van t_M bepaald voor alle waarnemingen.

Tabel 23: Minimale volgtijd t_M, alleen voertuigcategorie 1

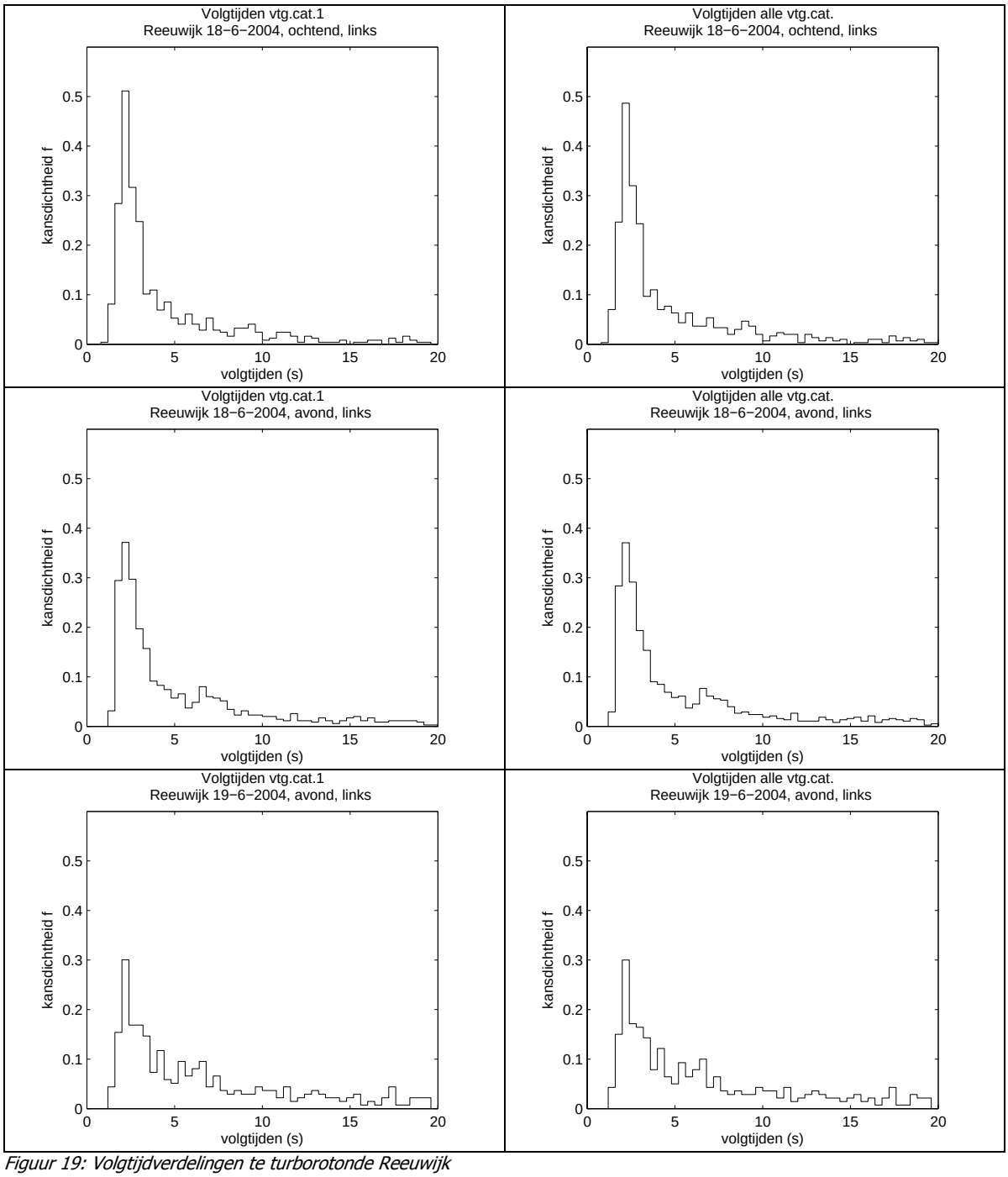
Meting	aant. waarn.	μ	σ^2	95% betrouwbaarheid interval [s]
18-6 ochtend	228	2,2	0,49	0,18
18-6 avond	385	2,2	0,52	0,14

Tabel 24: Minimale volgtijd t_M, alle voertuigcategorieën

Meting	aant. waarn.	μ	σ^2	95% betrouwbaarheid interval [s]
18-6 ochtend	275	2,2	0,49	0,17
18-6 avond	410	2,2	0,52	0,14



Figuur 18: Volgtijdverdelingen te Reeuwijk, h1= vrij verkeer, g= geclusterd verkeer, f= gemeten verdeling



Figuur 19: Volgtijdverdelingen te turborotonde Reeuwijk

1.5.3 Oprijvolgtijd (t_F)

De resultaten van de metingen zijn getoond in Figuur 20 en Figuur 21. De waarden van de oprijvolgtijd zijn weergegeven in Tabel 25 en Tabel 26.

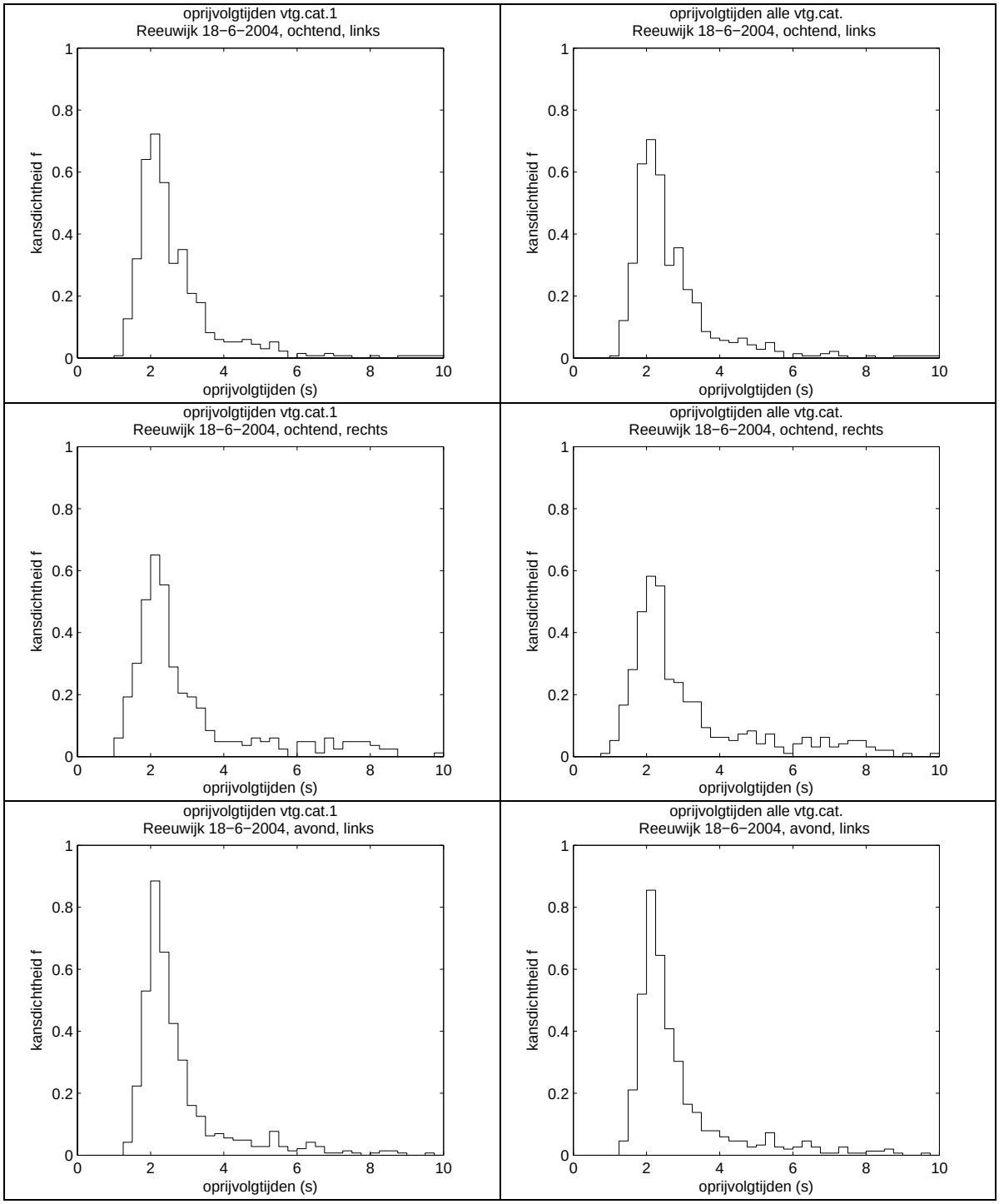
De resultaten van de meting van 19-6 liggen een stuk hoger dan de overige. Dit kan worden verklaard door de rustige avondspits van die dag. De overige waarden komen overeen met resultaten van de andere rotondes.

Tabel 25: Oprijvolgtijd t_F, alleen voertuigcategorie 1

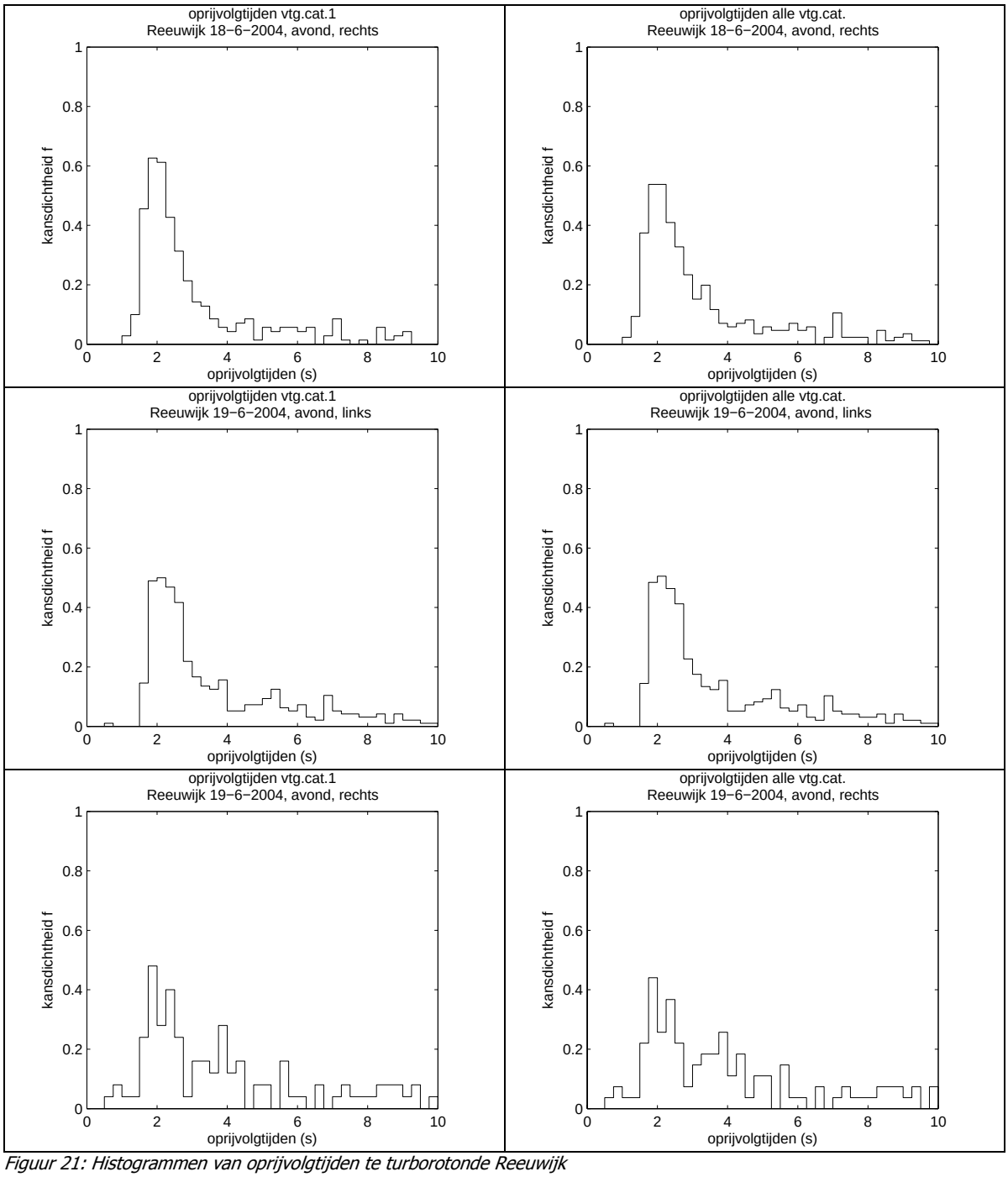
Meting	aant. waarn.	mediaan	μ	σ^2	95% betrouwbaarheid interval [s]
18-6 ochtend Li.	548	2,1	2,7	2,29	0,25
18-6 ochtend Re.	342	2,2	3,2	2,97	0,37
18-6 avond Li.	595	2,1	3,0	2,82	0,27
18-6 avond Re.	293	2,1	3,3	3,01	0,40
19-6 avond Li.	430	2,7	4,9	5,36	0,44
18-6 avond Re.	121	3,6	6,3	6,53	0,91
Gezamenlijk Li.	1143	2,1	2,9	2,58	0,19
Gezamenlijk Re.	635	2,1	3,3	2,99	0,27

Tabel 26: Oprijvolgtijd t_F , alle voertuigcategorieën

Meting	aant. waarn.	mediaan	μ	σ^2	95% betrouwbaarheid interval [s]
18-6 ochtend Li.	576	2,1	2,8	2,59	0,26
18-6 ochtend Re.	401	2,2	3,5	3,24	0,35
18-6 avond Li.	629	2,1	3,0	2,78	0,26
18-6 avond Re.	360	2,3	3,6	3,34	0,38
19-6 avond Li.	435	2,7	4,9	5,36	0,44
18-6 avond Re.	131	3,6	6,6	7,34	0,93
Gezamenlijk Li.	1205	2,1	2,9	2,69	0,19
Gezamenlijk Re.	761	2,3	3,5	3,29	0,26



Figuur 20: Histogrammen van oprijvolgtijden te turborotonde Reeuwijk



Figuur 21: Histogrammen van oprijvolgtijden te turborotonde Reeuwijk

1.6 Samenvatting resultaten afzonderlijke schatting

Onderstaand volgt een samenvatting van de resultaten. Per rotonde worden de representatieve waarden gegeven van de verschillende parameters. De parameters die niet betrouwbaar worden geacht worden niet weergegeven.

Tabel 27: Kritisch hiaat, t_C, Lognormaal verdeeld

Meting	aant. waarn.	μ	σ^2
Schipluiden	127	3,0	0,22
Papendrecht	-	-	-
Bergschenhoek	114	3,3	0,2
Turbo Rotterdam binnen	82	3,3	0,4
Turbo Rotterdam buiten	45	3,6	1,03
Turbo Reeuwijk links	133	3,8	0,65
Turbo Reeuwijk rechts	114	3,7	1,02

Tabel 28: Minimale volgtijd t_M

Meting	aant. waarn.	Gem.	Std.
Schipluiden	1018	2,2	0,49
Papendrecht	-	-	-
Bergschenhoek	1156	2,1	0,50
Turbo Rotterdam binnen	-	-	-
Turbo Rotterdam buiten	-	-	-
Turbo Reeuwijk	1672	2,2	0,57

Tabel 29: Oprijvolgtijd t_F

Meting	aant. waarn.	Med.	Std.
Schipluiden (gez.)	4372	2,1	0,69
Papendrecht	957	2,5	0,93
Bergschenhoek	426	1,8	0,73
Turbo Rotterdam (gez.)	312	2,2	0,80
Turbo Reeuwijk Li (gez.)	1495	2,2	1,57
Turbo Reeuwijk Re (gez.)	713	2,2	1,90

Tabel 30: Relatie φ v.s. q_R voor t_M=2,2 [s]

Meting	aant. punten.	intercept	helling	R^2
Enkelstrooks	13	0,991	-1,575	0,751
Turbo Rotterdam	7	1,079	-2,216	0,829
Turbo Reeuwijk	9	0,951	-2,702	0,726

Bijlage B

Deze bijlage bevat de resultaten van de gezamenlijke schatting van de parameters voor het analytisch model.

Inhoud

1 GEDETAILLEERDE RESULTATEN GEZAMENLIJKE SCHATTING 1

1.1 ALGEMEEN 1

1.1.1 Schattingsprocedure 1

1.1.2 Aantonen van de gewenste (on)afhankelijkheid 1

1.2 SCHIPLUIDEN 3

1.3 PAPENDRECHT 5

1.4 BERGSCHENHOEK 7

1.5 TURBOROTONDE ROTTERDAM 11

1.6 SAMENVATTING RESULTATEN GEZAMENLIJKE SCHATTING 14

1 Gedetailleerde resultaten gezamenlijke schatting

In deze bijlage worden de resultaten van de gezamenlijke schatting uitgebreid beschreven. Voordat deze resultaten worden behandeld zal eerst worden uitgelegd hoe de resultaten zijn gevonden en welke rekenmethodes er zijn gebruikt. Na deze uitleg worden, per rotonde, de resultaten gegeven.

1.1 Algemeen

1.1.1 Schattingsprocedure

De gezamenlijk schatting is een schatting van de parameters door middel van de kleinste kwadraten methode. Voor deze methode is gebruik gemaakt van het computerprogramma EXCEL. In EXCEL is iedere capaciteitswaarneming (de intensiteiten van de verkeersstromen gedurende vijf minuten onder capaciteitsomstandigheden) opgesplitst in de vier verschillende voertuigcategoriën, te weten: personenauto's, ongelede vrachtwagens, gelede vrachtwagens en overige, bijvoorbeeld landbouwverkeer. Hieruit volgt, per verkeersstroom, een opdeling in verschillende soorten voertuigen. Voor iedere stroom wordt een totale intensiteit in pae berekend door vaste pae waarden toe te kennen aan de verschillende voertuigcategoriën. Aan de hand van de resulterende intensiteiten van het rotondeverkeer en het afslaand verkeer kunnen met behulp van de capaciteitsformules de resulterende toeritcapaciteiten worden bepaald. Deze resultaten kunnen worden vergeleken met de gemeten toeritcapaciteit, dit levert een fout op.
De parameters van de capaciteitsformules kunnen nu worden geschat door de waarden van de parameters te laten variëren tot de som fouten van alle capaciteitswaarnemingen minimaal is. Dit variëren is gedaan met behulp van de "solver" functie in EXCEL.

1.1.2 Aantonen van de gewenste (on)afhankelijkheid

Als voorbeeld voor het aantonen van de gewenste afhankelijkheid en onafhankelijkheid is gebruik gemaakt van de data van Schipluiden. De volgende relaties zijn onderzocht:

- Rotondeverkeer – afslaand verkeer
- Toeritverkeer – afslaand verkeer
- Toeritverkeer – rotondeverkeer
- Ongelede vrachtwagens – gelede vrachtwagens

De relaties rotondeverkeer – afslaand verkeer en ongelede vrachtwagens – gelede vrachtwagens worden onderzocht met een enkelvoudige lineaire regressie. De relaties toeritverkeer – afslaand verkeer en toeritverkeer – rotondeverkeer worden onderzocht met een meervoudige regressie.

Enkelvoudige regressie

De enkelvoudige regressie is uitgevoerd in Matlab (commando "regress").

Meervoudige regressie

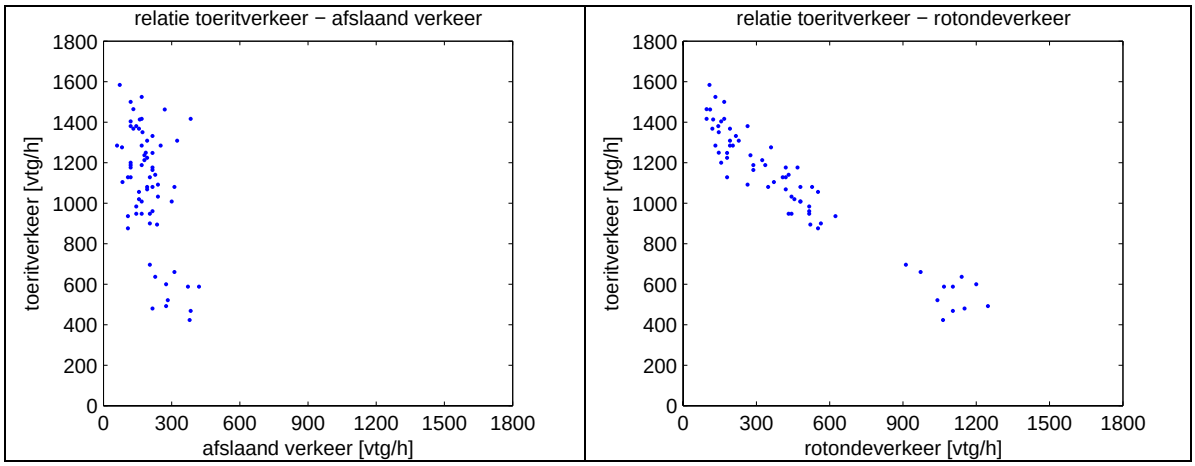
De meervoudige regressie is ook uitgevoerd in Matlab (commando "regress"). Hierbij wordt het volgende model gebruikt:

$$Y = \alpha + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \varepsilon$$

Hierin is:
Y = Intensiteit toeritverkeer [vtg/uur]
α = Intercept [vtg/uur]
β_1 = Regressieconstante voor afslaand verkeer [-]
x_1 = Intensiteit afslaand verkeer [vtg/uur]
β_2 = Regressieconstante voor rotondeverkeer [-]
x_2 = Intensiteit rotondeverkeer [vtg/uur]

De relaties zijn grafisch weergegeven in Figuur 22. Hierin is een duidelijke relatie te zien in het rechter figuur en een minder sterke relatie in het linker figuur. Verwacht wordt dat de het rotondeverkeer een grotere invloed zal hebben op het toeritverkeer dan het afslaande verkeer. Om hier een duidelijke uitspaak over te kunnen doen moet worden gekeken naar de regressieconstanten. Deze zijn getoond in Tabel 31. Hierin is te zien dat het 95% betrouwbaarheidsinterval voor β_1 rond de nul zit en dus niet significant van nul verschilt. De constante β_2 verschilt wel significant van nul. Dit toont aan dat er een sterke invloed is van het rotondeverkeer en een zwakke invloed van het afslaande verkeer.

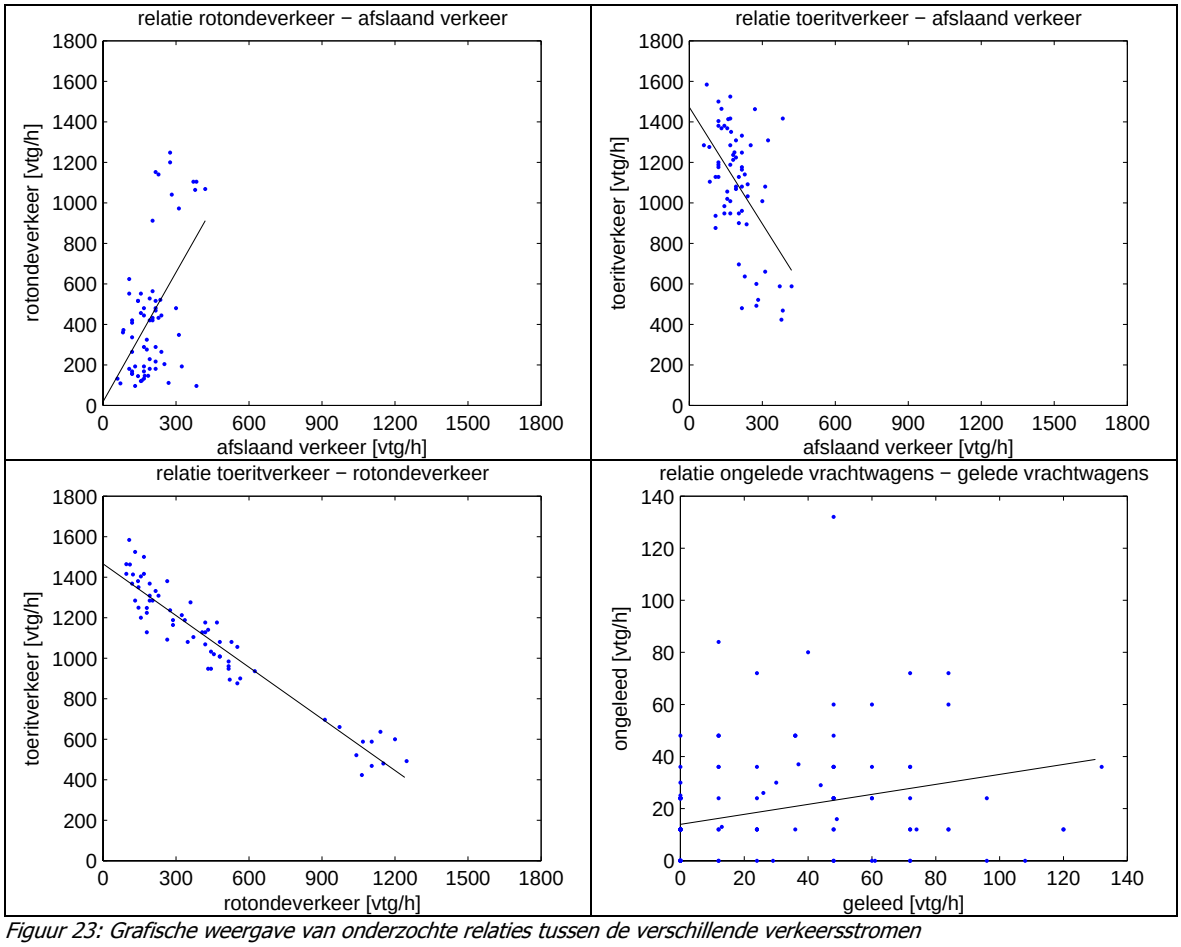
Tabel 31: Regressieconstanten		
	Laagste 95%	**Hoogste 95%**
α	1428	1544
β_1	-0.47	0.17
β_2	-0.91	-0.75
R^2	0,91	



Figuur 22: Invloeden van afslaand verkeer en rotondeverkeer op de toeritcapaciteit

1.2 Schipluiden

Voordat de parameters geschat worden moet worden vastgesteld of de gewenste afhankelijkheid, of onafhankelijkheid, aantoonbaar is. De relaties zijn getoond in Figuur 23. De regressieconstanten zijn weergegeven in Tabel 32.



Figuur 23: Grafische weergave van onderzochte relaties tussen de verschillende verkeersstromen

Tabel 32: Regressieconstanten voor relaties tussen verkeerstromen te Schipluiden

Relatie rotondeverkeer – afslaand verkeer		
	Laagste 95%	**Hoogste 95%**
α	-164,06	200,46
β	1,28	2,98
R^2	0,28	

Relatie ongeleed – geleed		
	Laagste 95%	**Hoogste 95%**
α	9,38	18,59
β	0,08	0,30
R^2	0,08	

Relatie toerit – afrit – rotonde		
	Laagste 90%	**Hoogste 90%**
α	1483,04	1490,35
β_1	-0,17	-0,13
β_2	-0,84	-0,83
R^2	0,91	

Uit de resultaten valt af te leiden dat voor de relatie 'toerit – afrit – rotonde' het 90% betrouwbaarheidsinterval voor β_1 niet significant van nul verschilt. De constante β_2 verschilt wel significant van nul. Dit toont aan dat er een sterke invloed is van het rotondeverkeer en een geringe invloed van het afslaande verkeer. Verder valt te concluderen dat, met een R^2 van 0,28, een zwakke relatie bestaat tussen het afslaande verkeer en het rotondeverkeer. De gewenste onafhankelijkheid tussen ongelede en gelede vrachtwagens is met een R^2 van 0,08 is wel aangetoond.

Vanwege de steile relatie tussen het afslaande verkeer en respectievelijk het rotondeverkeer en het toeritverkeer, zal een verandering in intensiteit van het afslaande verkeer niet veel invloed hebben op de overige intensiteiten. Uit deze conclusies volgt dat alle parameters geschat mogen worden.

De paparameters zijn op drie verschillende manieren geschat. Bij de eerste schatting zijn de pae-waarden mee geschat met de overige parameters. Dit leverde voor de methode van Tanner de kleinste fout op. Vervolgens zijn de afgeronde pae-waarden van Tanner vastgesteld in de overige modellen en zijn de parameters opnieuw geschat. Om te kijken wat de invloed is van de pae-waarde is de derde schatting gedaan met pae-waarden van één.

Tabel 33 geeft de Resultaten van de schattingen. De uitkomsten van de capaciteitsformules bij invulling van de geschatte parameters zijn getoond in Figuur 24.

Tabel 33: Resultaten van de gezamenlijke schatting

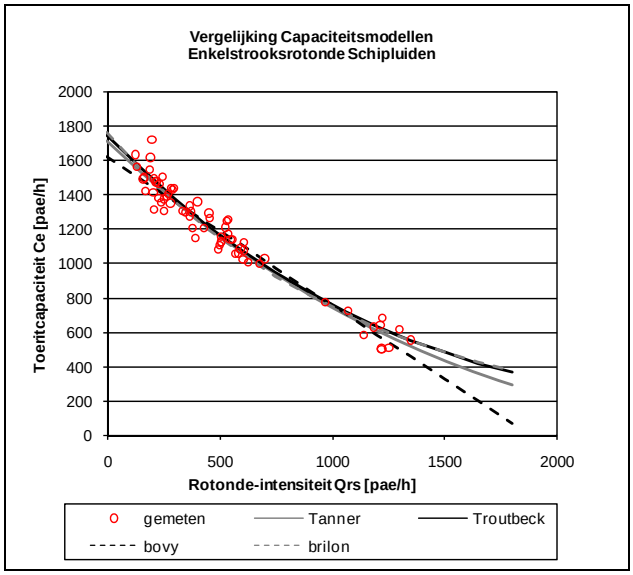
Parameters Bovy			
Pae 1	**1,66**	**1,90**	**1,00**
Pae 2	**2,60**	**2,40**	**1,00**
C0	1622	1622	1487
b	0,86	0,86	0,83
a	0,21	0,21	0,15
d (a/b)	0,24	0,24	0,18
MSE	5271	5358	7499

Parameter Brilon			
Pae 1	**2,00**	**1,90**	**1,00**
Pae 2	**2,19**	**2,40**	**1,00**
C0	1763	1768	1628
B	8,59	8,51	9,01
d	0,28	0,28	0,24
MSE	4818	4871	6468

Parameters Tanner			
Pae 1	**1,92**	**1,90**	**1,00**
Pae 2	**2,33**	**2,40**	**1,00**
tm	1,29	1,32	1,02
tc	3,68	3,65	4,10
tf	2,10	2,10	2,25
d	0,27	0,27	0,23
MSE	4652	4657	6414

Parameters Troutbeck			
Pae 1	**1,99**	**1,90**	**1,00**
Pae 2	**2,25**	**2,40**	**1,00**
tm	1,33	1,35	1,27
tc	3,83	3,76	4,23
tf	2,07	2,07	2,22
d	0,32	0,33	0,27
MSE	4858	4884	6554

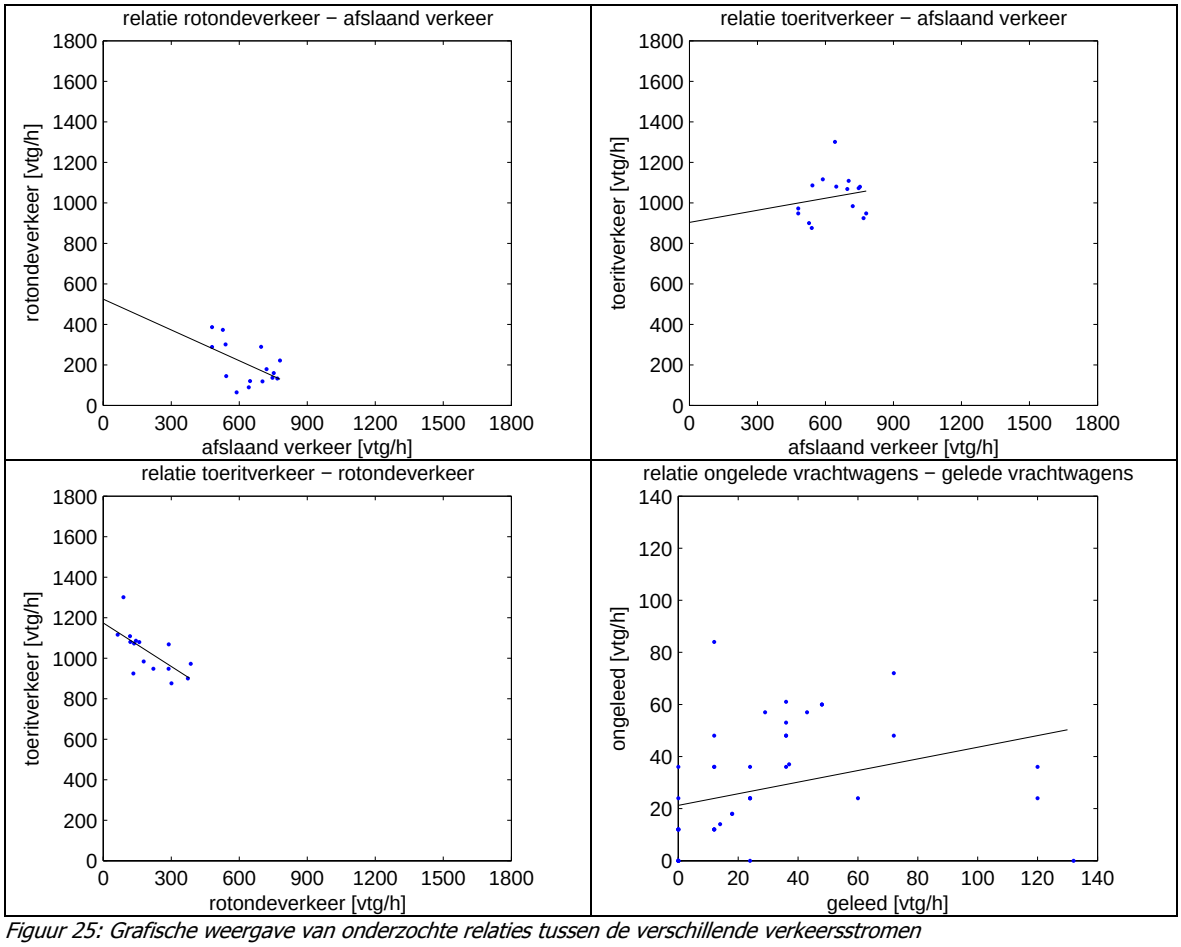
Uit deze resultaten valt te concluderen dat in eerste instantie de pae-waarden voor alle modellen ongeveer dezelfde waarde aannemen, alleen Brilon wijkt iets af. Daarnaast valt op dat de verandering van de pae-waarde geen extreme verandering teweeg brengt. Wanneer resultaten voor de parameters voor de hiaatacceptatiemodellen worden vergeleken met die van de afzonderlijke schatting, valt op dat de waarden voor het kritisch hiaat relatief hoog liggen en de waarde voor de minimale volgtijd relatief laag. De waarde voor oprijvolgtijd (2,1 [s]) komt overeen met de uitkomsten van de afzonderlijke schatting (2,1 [s]).



Figuur 24: vergelijking capaciteitsformules voor Schipluiden

1.3 Papendrecht

Voordat de parameters geschat worden moet worden vastgesteld of de gewenste afhankelijkheid, of onafhankelijkheid, aantoonbaar is. De relaties zijn getoond in Figuur 25. De waarden van de regressieconstanten zijn weergegeven in Tabel 34.



Figuur 25: Grafische weergave van onderzochte relaties tussen de verschillende verkeersstromen

Tabel 34: Regressieconstanten voor relaties tussen verkeerstromen te Papendrecht

Relatie rotondeverkeer – afslaand verkeer		
	Laagste 95%	**Hoogste 95%**
α	203,87	844,55
β	-1,00	-0,01
R^2	0,27	

Relatie ongeleed – geleed		
	Laagste 95%	**Hoogste 95%**
α	12,73	29,74
β	0,02	0,43
R^2	0,10	

Relatie toerit – afrit – rotonde		
	Laagste 90%	**Hoogste 90%**
α	1317,66	1367,49
β_1	-0,26	-0,19
β_2	-0,87	-0,80
R^2	0,48	

Uit deze figuren blijkt dat de data zich concentreert in een klein gebied. Hierdoor is de gewenste onafhankelijkheid of afhankelijkheid niet met voldoende zekerheid aangetoond. Vanwege de matige kwaliteit van de data kunnen niet alle parameters worden geschat. Vanwege de onduidelijke relatie (R^2=0,48) tussen 'rotondeverkeer – toeritverkeer – afslaand verkeer' kunnen de parameters *b* van Bovy, *B* van Brilon en t_C en t_M van Tanner en Troutbeck niet worden geschat.
Omdat de relatie tussen het afslaande verkeer en het toeritverkeer wel een zekere onafhankelijkheid laat zien (β_1 zit dicht bij nul) kan de parameter *d* wel geschat worden, evenals de *a* van Bovy. Verder zijn er voldoende waarnemingen van een hoge toerit intensiteit waardoor de parameters C_0 en t_F geschat kunnen worden.

De rotonde van Papendrecht heeft dezelfde rotondediameter als die van Schipluiden. Hierdoor kunnen waarden van de niet te schatten parameters (b van Bovy, B van Brilon en t_C en t_M van Tanner en Troutbeck) overgenomen worden van Schipluiden. Tabel 35 geeft weer welke parameters zijn geschat en welke zijn overgenomen uit Schipluiden. De in grijs aangegeven waarden zijn overgenomen. Vanwege het geringe aantal waarnemingen zal ook de pae-waarde worden overgenomen van Schipluiden. Tabel 35 geeft de resultaten van de schatting. De uitkomsten van de capaciteitsformules bij invulling van de geschatte parameters zijn getoond in Figuur 26.

Tabel 35: Resultaten gezamenlijke schatting

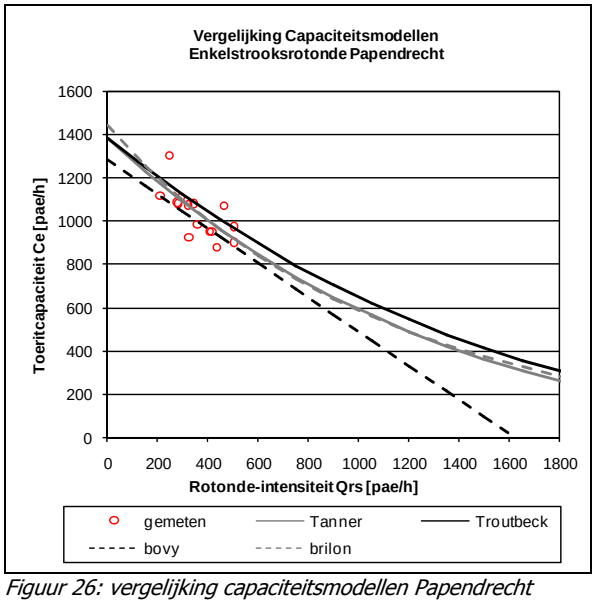
Parameters Bovy		
Pae 1	1,90	1,00
Pae 2	2,40	1,00
C0	1479	1286
b	0,89	0,79
a	0,21	0,15
d (a/b)	0,24	0,17
MSE	3140	5845

Parameter Brilon		
Pae 1	1,90	1,00
Pae 2	2,40	1,00
C0	1456	1440
B	8,51	9,01
d	0,11	0,27
MSE	2971	5722

Parameters Tanner		
Pae 1	1,90	1,00
Pae 2	2,40	1,00
tm	1,32	1,02
tc	3,65	4,10
tf	2,61	2,61
d	0,10	0,26
MSE	2898	5707

Parameters Troutbeck		
Pae 1	1,90	1,00
Pae 2	2,40	1,00
tm	1,35	1,27
tc	3,76	4,23
tf	2,60	2,58
d	0,09	0,26
MSE	2878	5696

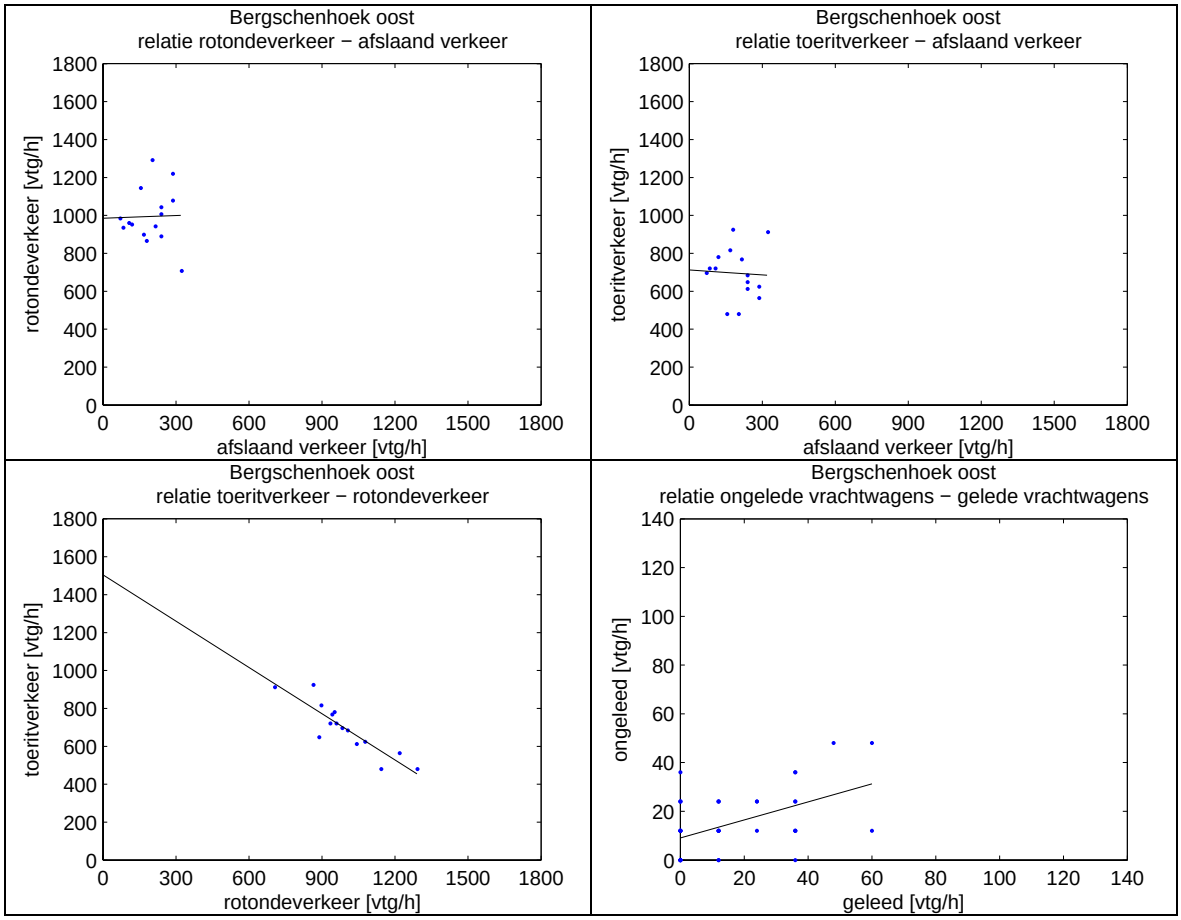
Uit deze resultaten blijkt dat de oprijvolgtijden een stuk hoger liggen (2,6 [s] t.o.v. 2,1 [s]) dan bij de rotonde in Schipluiden. Als gevolg hiervan zou de toeritcapaciteit lager moeten uitvallen en dat is terug te zien in de resultaten (Bovy 1479 [vtg] t.o.v. 1622 [vtg] en Brilon 1456 [vtg] t.o.v. 1763 [vtg]). Dit alles is waarschijnlijk het gevolg van de slechte weersomstandigheden.



Figuur 26: vergelijking capaciteitsmodellen Papendrecht

1.4 Bergschenhoek

Voordat de parameters geschat worden moet worden vastgesteld of de gewenste afhankelijkheid, of onafhankelijkheid aantoonbaar is. Aangezien er meetgegevens van twee verschillende takken van de rotonde van Bergschenhoek zijn, worden hier dubbele resultaten gegeven. De relaties zijn getoond in Figuur 27 en Figuur 28, de regressieconstanten zijn weergegeven in Tabel 36 en Tabel 37.



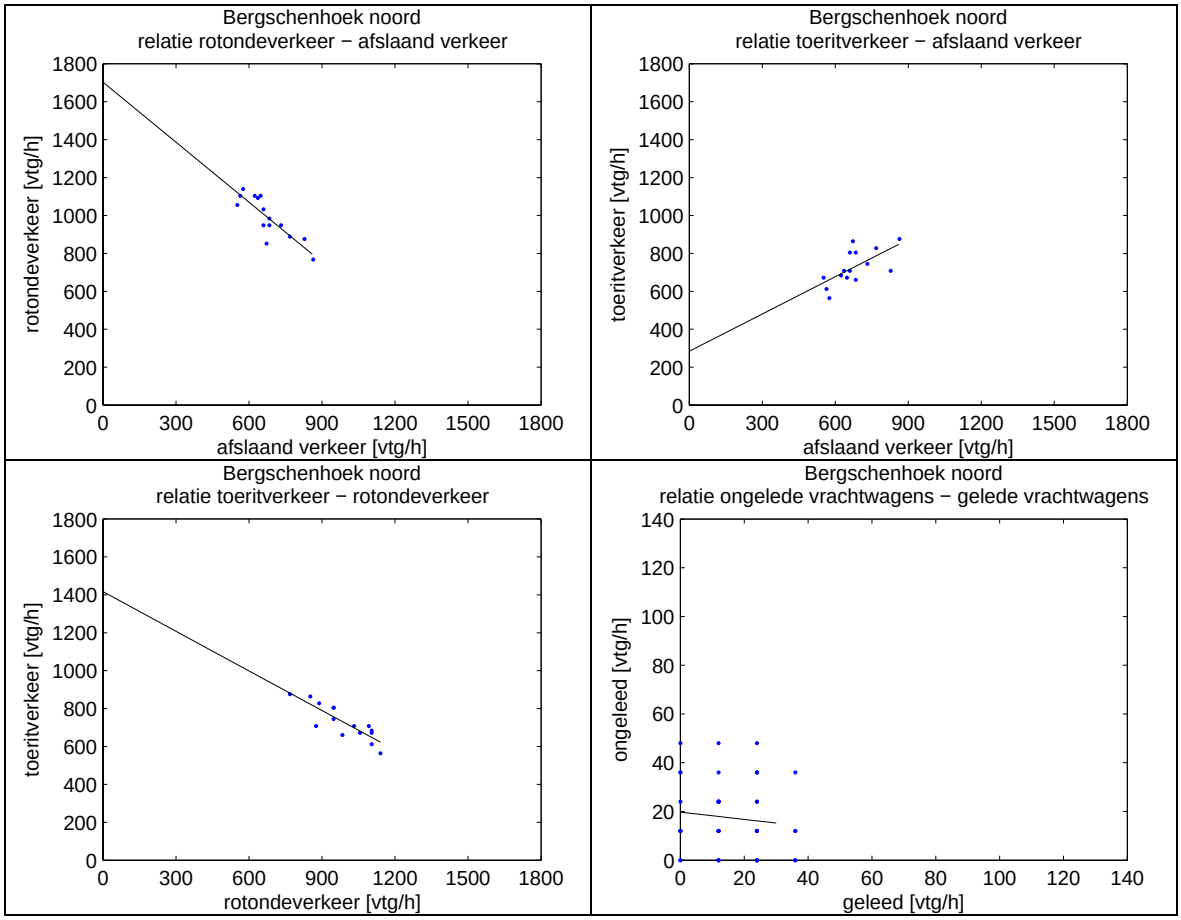
Figuur 27: Grafische weergave van onderzochte relaties tussen de verschillende verkeersstromen Bergschenhoek oost

Tabel 36: Regressieconstanten voor relaties tussen verkeerstromen te Bergschenhoek oost

Relatie rotondeverkeer – afslaand verkeer		
	Laagste 95%	**Hoogste 95%**
α	748,13	1222,26
β	-1,09	1,18
R^2	0,00	

Relatie ongeleed – geleed		
	Laagste 95%	**Hoogste 95%**
α	4,67	13,48
β	0,18	0,56
R^2	0,25	

Relatie toerit – afrit – rotonde		
	Laagste 90%	**Hoogste 90%**
α	1496,95	1530,00
β_1	-0,08	-0,02
β_2	-0,83	-0,80
R^2	0,79	



Figuur 28: Grafische weergave van onderzochte relaties tussen de verschillende verkeersstromen Bergschenhoek noord

Tabel 37: Regressieconstanten voor relaties tussen verkeerstromen te Bergschenhoek noord

Relatie rotondeverkeer – afslaand verkeer		
	Laagste 95%	**Hoogste 95%**
α	1434,48	1970,66
β	-1,45	-0,66
R^2	0,72	

Relatie ongeleed – geleed		
	Laagste 95%	**Hoogste 95%**
α	11,95	27,49
β	-0,55	0,25
R^2	0,01	

Relatie toerit – afrit – rotonde		
	Laagste 90%	**Hoogste 90%**
α	1748,80	1849,33
β_1	-0,32	-0,25
β_2	-0,92	-0,86
R^2	0,75	

Uit de figuren blijkt dat de waarnemingen zich, net als bij Papendrecht, concentreren in een relatief klein gebied. De data beperkt zich tot waarnemingen met een hoge intensiteit rotondeverkeer en relatief lage intensiteit toeritverkeer. Echter, binnen dit gebied toont de data voor Meting Oost de gewenste relaties.
In de waarnemingen van meting Noord is (met R^2=0.72) een relatie te zien tussen rotondeverkeer en afritverkeer. Dit is niet gewenst. Verder is waar te nemen dat de data uit meting Oost en meting Noord niet samengevoegd mogen worden vanwege afwijkende puntenwolken voor relaties met afslaand verkeer. Dit komt waarschijnlijk door de verschillende breedtes van de middengeleiders.

Vanwege de matige kwaliteit van de data kunnen niet alle parameters worden geschat. Voor de rotonde-intensiteit zijn veelal hoge waarden waargenomen, hierdoor is de C_0 niet goed vast te stellen. Daarnaast betekent dit dat er weinig waarnemingen zijn van meerdere voertuigen die gebruik maken van één hiaat, waardoor de waarde van t_F niet juist geschat kan worden. Ook geeft dit een onderschatting van de minimale opvolgtijd t_M. De relatie tussen toeritverkeer en rotondeverkeer is wel duidelijk. Dit maakt het mogelijk om, voor zowel meting Oost als Noord, parameters (b) van Bovy, B van Brilon en t_C van Tanner en Troutbeck te schatten. Voor meting Oost is voldoende onafhankelijkheid tussen afslaand verkeer en toerit- en rotondeverkeer om de parameters a (van Bovy) en d te schatten. Voor meting Noord is dit niet het geval. Vanwege de matige spreiding en het samenvallen van veel punten zullen de pae-waarden overgenomen worden.
De waarden die niet kunnen worden geschat worden overgenomen uit Schipluiden.
Tabel 38 geeft de resultaten voor meting Oost en Tabel 39 geeft de resultaten voor meting Noord. De uitkomsten van de capaciteitsformules bij invulling van de geschatte parameters zijn getoond in Figuur 29 en Figuur 30.De in grijs aangegeven waarden zijn overgenomen uit Schipluiden.

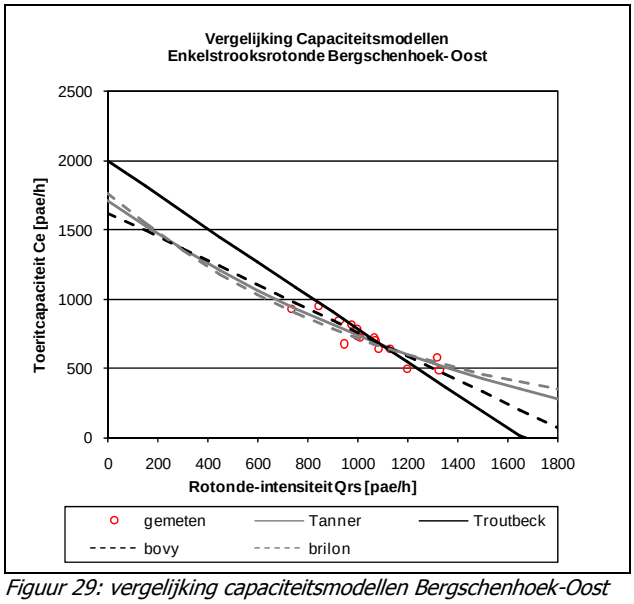
Tabel 38: Resultaten gezamenlijke schatting meting Oost

Parameters Bovy		
Pae 1	1,90	1,00
Pae 2	2,40	1,00
C0	1622	1487
b	0,86	0,79
a	-0,01	0,03
d (a/b)	-0,01	0,04
MSE	3024	4193

Parameter Brilon		
Pae 1	1,90	1,00
Pae 2	2,40	1,00
C0	1768	1628
B	9,01	8,73
d	-0,19	-0,05
MSE	3513	4527

Parameters Tanner		
Pae 1	1,90	1,00
Pae 2	2,40	1,00
tm	1,32	1,02
tc	3,71	3,93
tf	2,10	2,25
d	-0,09	0,01
MSE	2993	3544

Parameters Troutbeck		
Pae 1	1,90	1,00
Pae 2	2,40	1,00
tm	1,10	1,27
tc	3,86	4,12
tf	2,07	2,22
d	-0,07	0,00
MSE	3284	4481



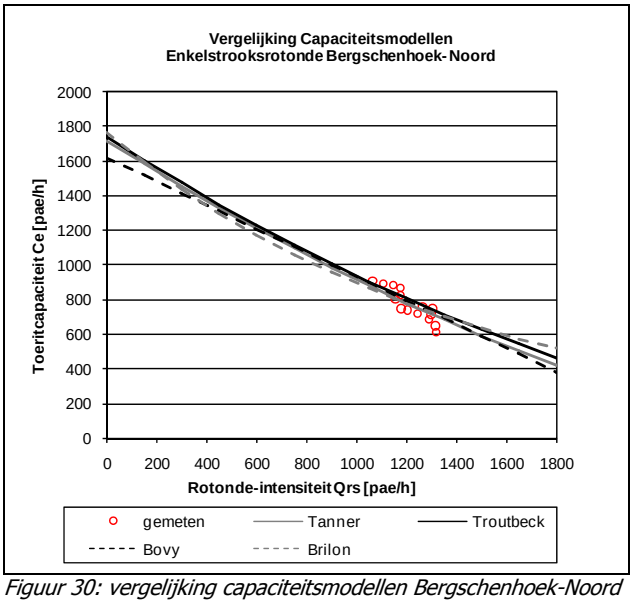
Figuur 29: vergelijking capaciteitsmodellen Bergschenhoek-Oost

Tabel 39: Resultaten gezamenlijke schatting meting Noord		
Parameters Bovy		
Pae 1	1,90	1,00
Pae 2	2,40	1,00
C0	1622	1487
b	0,69	0,67
a	0,21	0,15
d (a/b)	0,30	0,22
MSE	2249	2181

Parameter Brilon		
Pae 1	1,90	1,00
Pae 2	2,40	1,00
C0	1768	1628
B	6,82	7,02
d	0,28	0,24
MSE	2986	2812

Parameters Tanner		
Pae 1	1,90	1,00
Pae 2	2,40	1,00
tm	1,32	1,02
tc	2,94	3,33
tf	2,10	2,25
d	0,27	0,23
MSE	2249	2181

Parameters Troutbeck		
Pae 1	1,90	1,00
Pae 2	2,40	1,00
tm	1,35	1,27
tc	2,94	3,34
tf	2,07	2,22
d	0,33	0,27
MSE	2610	2672

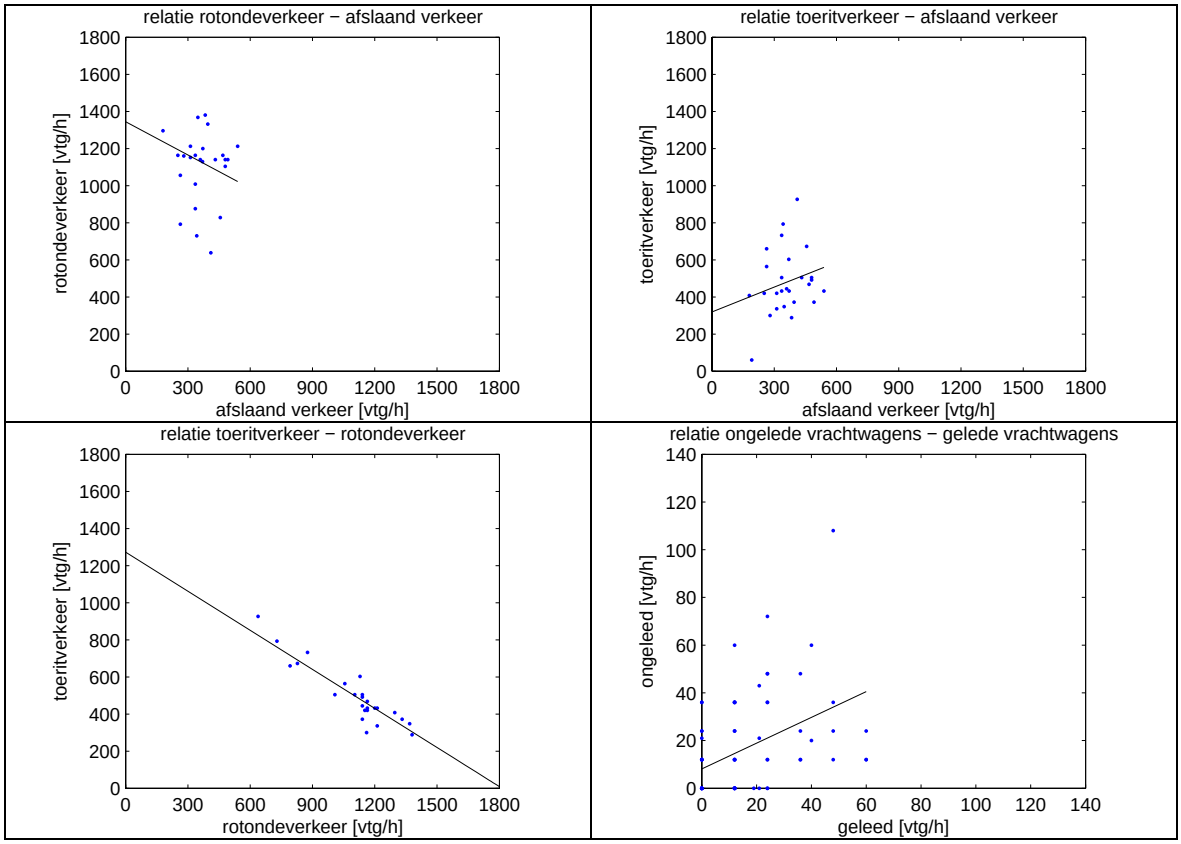


Figuur 30: vergelijking capaciteitsmodellen Bergschenhoek-Noord

1.5 Turborotonde Rotterdam

De turborotonde is een tweestrooks- in plaats van een enkelstrooksrotonde. De formules van Tanner en Troutbeck kunnen hier dus niet worden toegepast. Daarnaast wijkt de turborotonde af van de conventionele tweestrooksrotonde, omdat er op de rotonde niet van rijstrook hoeft te worden gewisseld. De meetresultaten geven alleen intensiteiten van de linker toeritstrook, hierdoor zijn alleen de formules bruikbaar die gelden per toeritstrook. De formule van Brilon geeft een toeritcapaciteit van de gehele toerit en niet van een enkele toeritstrook, hierdoor is de formule van Brilon niet bruikbaar. Alleen de formules van Bovy, Fisk en Hagring zullen worden behandeld.

Voordat de parameters geschat worden moet worden vastgesteld of de gewenste afhankelijkheid, of onafhankelijkheid aantoonbaar is. De relaties zijn getoond in Figuur 31, en de regressieconstanten zijn weergegeven in Tabel 40.
Uit deze figuren valt te concluderen dat ook hier de data beperkt is in zijn bereik. Er zijn hoofdzakelijk waarnemingen van een hoge rotonde-intensiteit. De data laten echter wel de gewenste afhankelijkheid en onafhankelijkheid zien.



Figuur 31: Grafische weergave van onderzochte relaties tussen de verschillende verkeersstromen

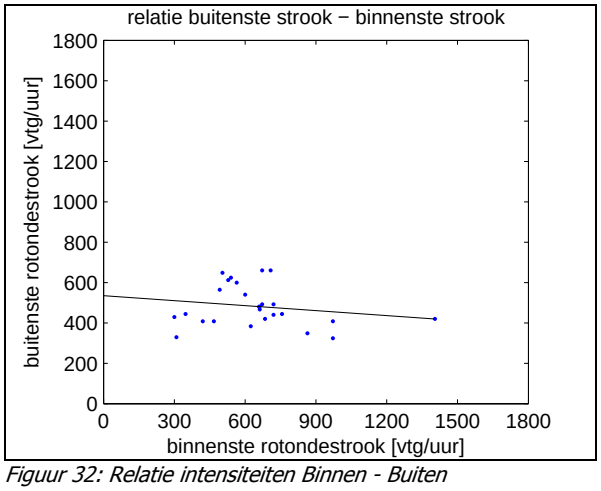
Tabel 40: Regressieconstanten voor relaties tussen verkeerstromen te Bergschenhoek noord

Relatie rotondeverkeer – afslaand verkeer		
	Laagste 95%	**Hoogste 95%**
α	955,21	1733,46
β	-1,64	0,45
R^2	0,05	

Relatie ongeleed – geleed		
	Laagste 95%	**Hoogste 95%**
α	2,64	13,61
β	0,29	0,79
R^2	0,20	

Relatie toerit – afrit – rotonde		
	Laagste 90%	**Hoogste 90%**
α	1247.98	1271.64
β_1	0.01	0.05
β_2	-0.71	-0.69
R^2	0,87	

Vanwege het geringe aantal waarnemingen is besloten de pae-waarde niet mee te schatten maar over te nemen. Het afslaande verkeer is voldoende onafhankelijk (R^2=0.05 en $\beta_1 \approx 0{,}00$) om de parameters *a* en *d* te kunnen schatten.
Er zijn niet veel lage rotonde-intensiteiten waargenomen, dus de schatting van C_0 is niet heel betrouwbaar, maar zal wel mee worden geschat om een beeld te krijgen van de invloed van de tweede rotondestrook.
Om de overige parameters te kunnen schatten dienen de intensiteiten op de twee rotondestroken onafhankelijk van elkaar te zijn. Om deze onafhankelijkheid aan te tonen is een nieuw figuur gemaakt, Figuur 32. De regressieconstanten zijn weergegeven in Tabel 41.



Figuur 32: Relatie intensiteiten Binnen - Buiten

Tabel 41: relatie binnen - buiten		
Relatie rotondeverkeer – afslaand verkeer		
	Laagste 90%	**Hoogste 90%**
α	527,22	542,56
β	-0,09	-0,07
R^2	0,04	

Uit de resultaten valt op te maken dat onafhankelijkheid (R^2=0,04) vast gesteld kan worden. Vanwege de aantoonbaarheid van de gewenste (on)afhankelijkheden tussen de verschillende verkeersstromen, is besloten de parameters allemaal te schatten. De uitkomsten zullen, vanwege de geringe hoeveelheid data, niet heel betrouwbaar zijn en dienen slechts ter indicatie.

De resultaten van de schatting zijn weergegeven in Tabel 42. De uitkomsten van de capaciteitsformules bij invulling van de geschatte parameters zijn getoond in Figuur 33.

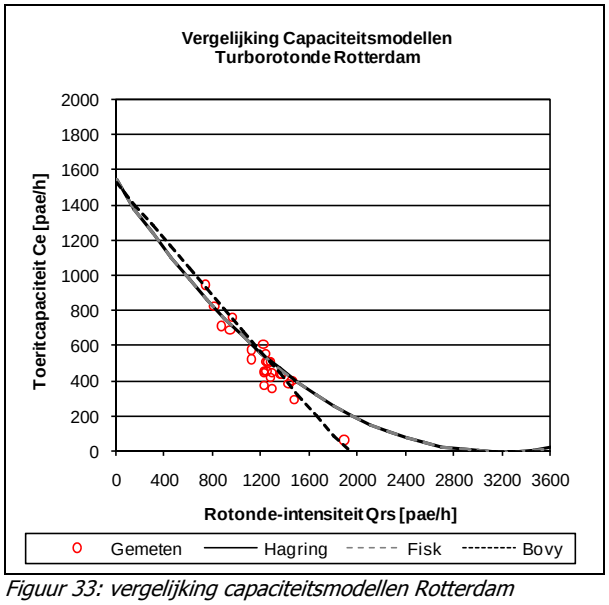
Tabel 42: Resultaten gezamenlijke schatting

Parameters Bovy		
Pae 1	1,90	1,00
Pae 2	2,40	1,00
C0	1381	1269
a	0,02	-0,04
b, licht	0,76	0,75
b, zwaar	0,69	0,69
MSE	2268	3747

Parameters Fisk		
Pae 1	1,90	1,00
Pae 2	2,40	1,00
tm	2,25	2,16
tc,1	4,17	4,86
tc,2	4,53	5,10
tf	1,88	2,10
d	0,00	-0,19
MSE	1919	3142

Parameters Hagring		
Pae 1	1,90	1,00
Pae 2	2,40	1,00
tm	2,02	1,88
tc,1	4,17	4,89
tc,2	4,44	5,07
tf	1,90	2,11
d	0,00	-0,20
MSE	1933	3151

Wat opvalt is dat de resultaten van de kritisch hiaten hoger liggen (4,2 en 4,5 t.o.v. 3,7) dan bij de enkelstrooksrotonde. Daarnaast valt op dat de parameter *d* de waarde nul aanneemt. Dit betekent dat het afslaande verkeer weinig invloed heeft op het proces. De waarden van t_F en t_M komen, in tegenstelling tot de resultaten van de enkelstrooks rotondes, sterk overeen met de resultaten van de afzonderlijke schatting.



Figuur 33: vergelijking capaciteitsmodellen Rotterdam

1.6 Samenvatting resultaten gezamenlijke schatting

In deze paragraaf zal in tabelvorm een overzicht worden gegeven van de bepaalde parameters. Ter vergelijking zijn ook de resultaten van de afzonderlijke schatting weergegeven. Achtereenvolgens zullen de volgende parameters worden behandeld: a, b, C_0, B, d, t_C, t_M en t_F. De parameters die zijn overgenomen zijn weggelaten.

Invloed van het afslaande verkeer (a)

	Pae = 1,9 & 2,4	**Pae = 1**
Schipluiden	0,21	0,15
Papendrecht	-	-
Bergschenhoek Oost	-0,01	0,03
Turborotonde	0,02	-0,04

Invloed aantal rijstroken op de rotonde (b)

	Pae = 1,9 & 2,4	**Pae = 1**
Schipluiden	0,86	0,83
Papendrecht	0,89	0,79
Bergschenhoek Oost	0,86	0,79
Bergschenhoek Noord	069	0.67
Turborotonde b-licht	0,76	0,75
Turborotonde b-zwaar	0,69	0,69

Maximale capaciteit van een toeritstrook (C_0)

	Bovy		**Brilon**	
	Pae = 1,9 & 2,4	**Pae = 1**	**Pae = 1,9 & 2,4**	**Pae = 1**
Schipluiden	1622	1487	1768	1628
Papendrecht	1479	1286	1456	1440
Bergschenhoek	-	-	-	-
Turborotonde	1381	1269	-	-

Invloed van het rotondeverkeer (B)

	Pae = 1,9 & 2,4	**Pae = 1**
Schipluiden	8,50	9,01
Papendrecht	-	-
Bergschenhoek Oost	9,01	7,73
Bergschenhoek Noord	6,82	7,02
Turborotonde	-	-

Invloed van het geometrisch ontwerp van de rotonde op het schijnconflict (d)

	Bovy		**Brilon**		**Tanner / Fisk**		**Troutbeck / Hagring**	
	Pae = 1,9 & 2,4	**Pae = 1**	**Pae = 1,9 & 2,4**	**Pae = 1**	**Pae = 1,9 & 2,4**	**Pae = 1**	**Pae = 1,9 & 2,4**	**Pae = 1**
Schipluiden	0,24	0,18	0,28	0,24	0,27	0,23	0,33	0,27
Papendrecht	0,24	0,17	0,11	0,27	0,10	0,26	0,09	0,26
Bergschenhoek Oost	-0,01	0,04	-0,19	-0,05	-0,09	0,01	-0,07	0,00
Bergschenhoek Noord	0,30	0,22	-	-	-	-	-	-
Turborotonde	0,02	-0,04	-	-	0,00	-0,19	0,00	-0,20

Kritisch hiaat (t_C)

	Tanner / Fisk		Troutbeck / Hagring		Maximum Likelihood
	Pae = 1,9 & 2,4	**Pae = 1**	**Pae = 1,9 & 2,4**	**Pae = 1**	**lognormaal**
Schipluiden	3,65	4,10	3,76	4,23	3,0
Papendrecht	-	-	-	-	-
Bergschenhoek, Oost	3,71	3,93	3,80	4,05	3,3
Bergschenhoek, Noord	2,94	3,33	2,94	3,34	-
Turbo R'dam tC,I	4,17	4,86	4,17	4,89	3,3
Turbo R'dam tC,U	4,53	5,10	4,44	5,07	3,6
Turbo Reeuwijk Li	-	-	-	-	3,8
Turbo Reeuwijk Re	-	-	-	-	3,8

Minimale volgtijd (t_M)

	Tanner / Fisk		Troutbeck / Hagring		Hoogendoorn
	Pae = 1,9 & 2,4	**Pae = 1**	**Pae = 1,9 & 2,4**	**Pae = 1**	
Schipluiden	1,32	1,02	1,35	1,27	2,2
Papendrecht	-	-	-	-	-
Bergschenhoek	-	-	-	-	2,1
Turbo Rotterdam	2,25	2,16	2,02	1,88	-
Turbo Reeuwijk	-	-	-	-	2,2

Oprijvolgtijd toeritverkeer (t_F)

	Tanner / Fisk		Troutbeck / Hagring		Mediaan data
	Pae = 1,9 & 2,4	**Pae = 1**	**Pae = 1,9 & 2,4**	**Pae = 1**	**alle vtg.cat.**
Schipluiden	2,10	2,25	2,07	2,22	2,1
Papendrecht	2,61	2,61	2,60	2,58	2,5
Bergschenhoek	-	-	-	-	1,8
Turbo R'dam	1,88	2,10	1,90	2,11	2,2
Turbo Reeuwijk, Li	-	-	-	-	2,2
Turbo Reeuwijk, Re	-	-	-	-	2,2

Bijlage C

Deze bijlage bevat de kalibratieresultaten van het VISSIM model.

Inhoud

1 GEDETAILLEERDE KALIBRATIERESULTATEN SIMULATIEMODEL 2

1.1 KALIBRATIERESULTATEN ENKELSTROOKSROTONDE. 2

1.2 KALIBRATIE VAN HET SCHIJNCONFLICT 2

1.3 KALIBRATIE VAN DE VOLGTIJD EN OPRIJVOLGTIJD 3

1.4 KALIBRATIE VAN HET KRITISCH HIAAT 5

1.5 VALIDATIE VAN HET MODEL 6

1.6 TOEPASSING VAN INSTELLINGEN OP BERGSCHENHOEK 7

1.7 KALIBRATIERESULTATEN TURBOROTONDE 9

1 Gedetailleerde kalibratieresultaten simulatiemodel

1.1 Kalibratieresultaten enkelstrooksrotonde.

De kalibratie van het model bestaat uit drie verschillende stappen, te weten:

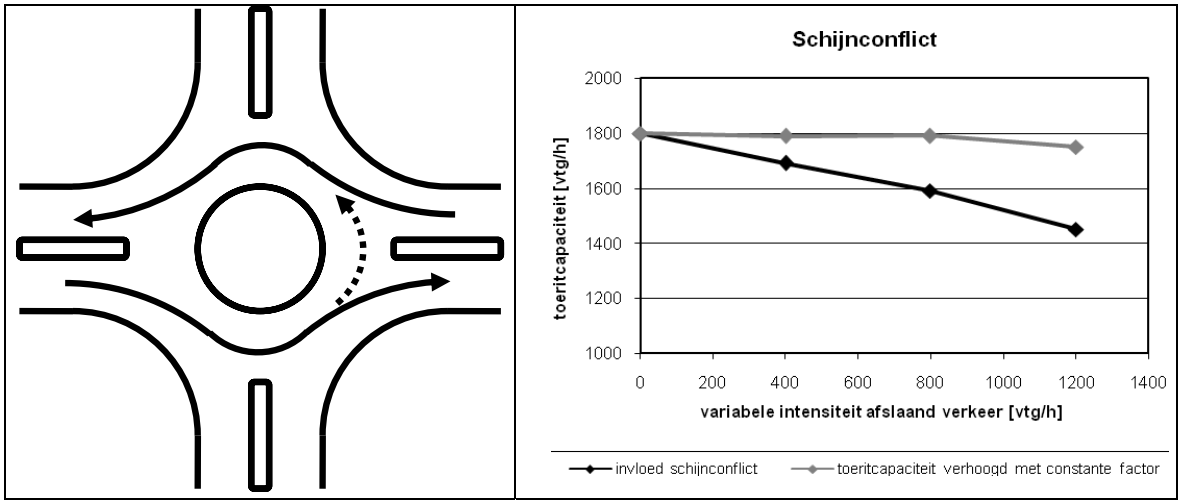
- Juist in rekening brengen van het schijnconflict;
- Aanpassen van het volgmodel zodat dat de verdelingen van de volgtijd en de oprijvolgtijd overeenkomen met de werkelijkheid;
- Instellen en verschuiven van de voorrangsregels zodat het kritisch hiaat overeenkomt met de werkelijkheid.

Na de kalibratie volgt de validatie door de in het model gemeten intensiteiten en capaciteiten te vergelijken met de werkelijke intensiteiten en capaciteiten.
De kalibratie is eerst gedaan voor de enkelstrooksrotonde van Schipluiden, omdat de data van deze rotonde het meest bruikbaar is. Nadat dit model is gekalibreerd en gevalideerd wordt onderzocht of, met de gevonden set parameters, de resultaten op de andere rotondetypen ook overeenkomen met de werkelijkheid.

Achtereenvolgens zullen de verschillende stappen van de kalibratie en de validatie worden behandeld.

1.2 Kalibratie van het schijnconflict

Het schijnconflict wordt gekalibreerd door twee verkeersstromen in tegenovergestelde richting over de rotonde te laten rijden zoals getoond in Figuur 34. Gedurende een aantal verschillende metingen zal één verkeersstroom met een constante intensiteit van 1800 vtg/u rijden. De tegenovergestelde stroom zal in stappen van 400 vtg/u worden verhoogd van 0 tot 1800 vtg/u. Als gevolg van het schijnconflict zal de capaciteit van de toerit met de constante stroom afnemen naarmate de intensiteit van de tegenovergestelde stroom groter wordt. Wanneer de intensiteiten tegen elkaar worden uitgezet in een grafiek ontstaat er een lineair verband die de invloed van het schijnconflict beschrijft. Wanneer de bij de toeritcapaciteit een percentage van de conflicterende stroom wordt opgeteld ontstaat er een horizontale lijn. De hoogte van dit percentage is de invloed van het schijnconflict. Een en ander wordt verduidelijkt aan de hand van de grafiek in Figuur 34.

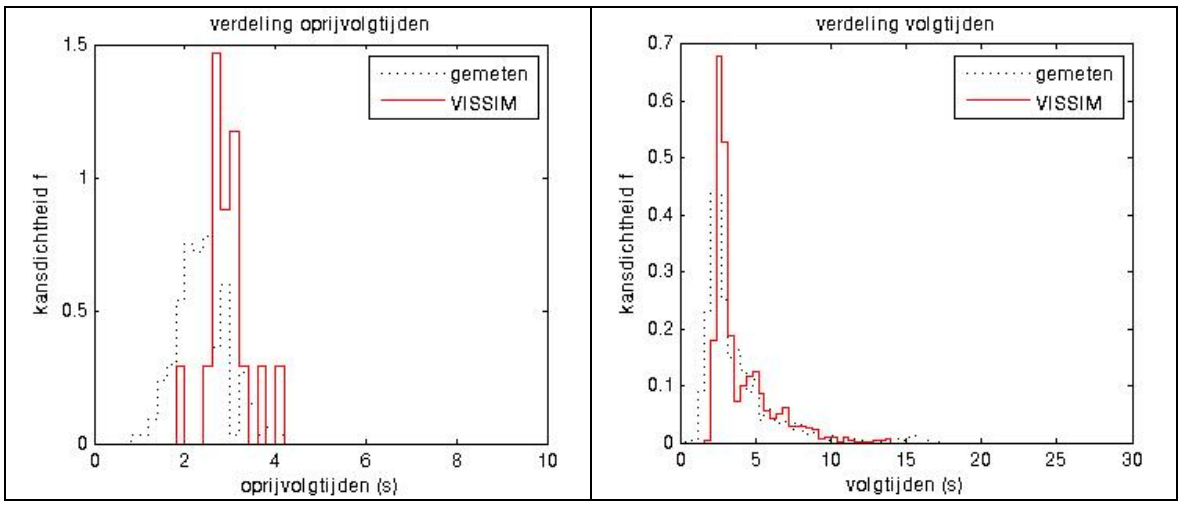


Figuur 34: Schijnconflict: Links: verkeersstromen op rotonde, Rechts: invloed schijnconflict op toeritcapaciteit

Uit het onderzoek voor het analytisch model is gebleken dat de invloed van het schijnconflict in deze situatie 0,25 [-] bedraagt. Om ook in het model tot deze waarde te komen wordt het beginpunt van de connector verschoven. Uit deze kalibratie is gebleken dat wanneer het beginpunt van de connector, op het tangentpunt van de boog, met 3,70m stroomopwaarts wordt verschoven, de invloed van het schijnconflict 0,25 [-] bedraagt. Deze kalibratie is in eerste instantie uitgevoerd voor de enkelstrooksrotonde van Schipluiden. Vervolgens is de verschuiving van 3,70m ook toegepast op de enkelstrooksrotonde van Bergschenhoek en op de standaard enkelstrooksrotonde. Ook bij deze rotondes bleek een verschuiving van 3,70m een schijnconflict in het model op te leveren dat gelijk is aan het gemeten schijnconflict.

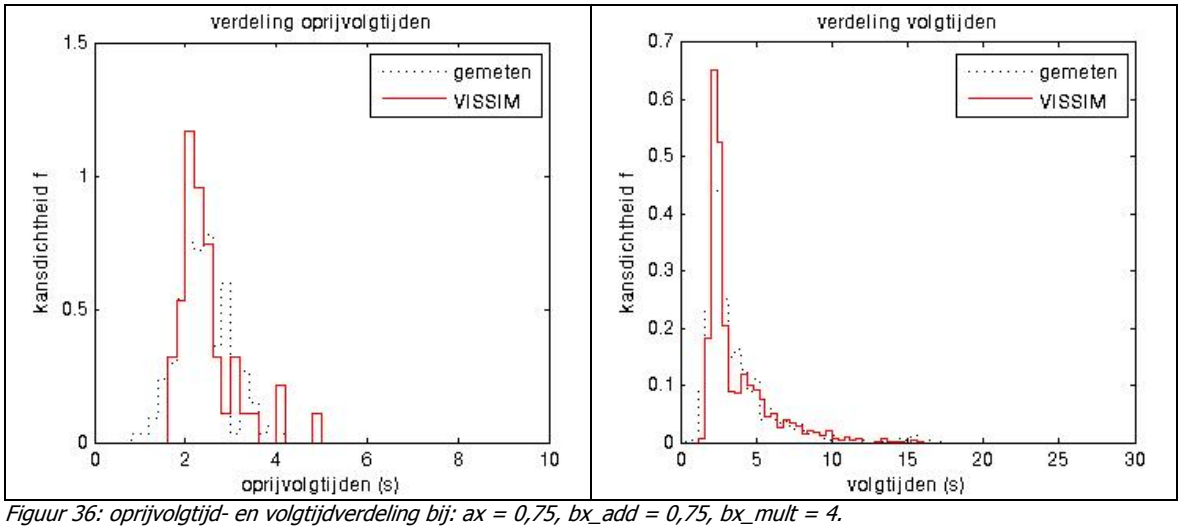
1.3 Kalibratie van de volgtijd en oprijvolgtijd

De verdelingen voor de oprijvolgtijd van het toeritverkeer en de volgtijd van het rotondeverkeer kunnen worden beïnvloedt door de parameters van de volgtijdverdeling van Wiedemann in VISSIM aan te passen. Deze parameters worden stapsgewijs aangepast tot de verdelingen de gewenste vorm hebben. Er wordt begonnen met de standaard VISSIM instellingen. In Figuur 35 is te zien dat de verdelingen te ver naar rechts liggen en een te kleine spreiding hebben.



Figuur 35: oprijvolgtijd- en volgtijdverdeling bij: ax = 2, bx_add = 2, bx_mult = 3. (standaard VISSIM instellingen)

Aan de hand van de resultaten is besloten *ax* te verlagen om de oprijvolgtijdverdeling naar links te verplaatsen, de bx_add te verlagen om de oprijvolgtijd- en volgtijdverdeling naar links te verplaatsen en de bx_mult te verhogen om de spreiding te vergroten.
Na tien iteraties zijn optimale resultaten gevonden, deze zijn getoond in Figuur 36. Met deze instellingen zijn vijf simulaties gedaan met verschillende random seeds en hieruit is gebleken dat de getoonde resultaten constant zijn. De parameters die resulteren uit de kalibratie zijn weergegeven in Tabel 43



Figuur 36: oprijvolgtijd- en volgtijdverdeling bij: ax = 0,75, bx_add = 0,75, bx_mult = 4.

Van de data uit VISSIM zijn, op dezelfde wijze als voor het analytische model, de parameters van de verdelingen berekend. Deze parameters zijn getoond in Tabel 43. Ter vergelijking zijn ook de verdelingsparameters van de gemeten data weergegeven. Uit de gegevens blijkt dat de resultaten redelijk overeen komen. De parameters die resulteren uit de kalibratie zijn weergegeven in Tabel 44

Tabel 43: Vergelijking statistische gegevens

	Oprijvolgtijd	
	Mediaan	**St. deviatie**
Gemeten	2,10	0,662
VISSIM	2,15	0,637

	Volgtijd	
	t_M	**St. deviatie**
Gemeten	2,15	0,493
VISSIM	2,11	0,316

Tabel 44: parameters volgmodel Wiedemann

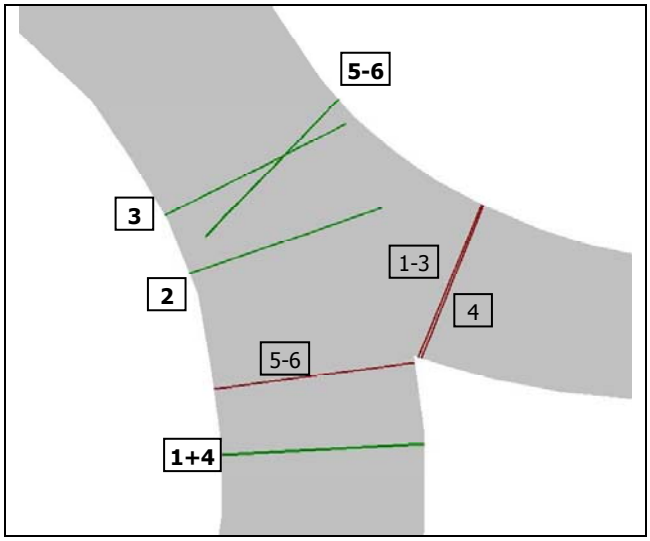
ax	0,75
bx_add	0,75
bx_mult	4,00

1.4 Kalibratie van het kritisch hiaat

Het kritisch hiaat wordt gekalibreerd door middel van aanpassingen aan de voorrangsregels. In eerste instantie zijn de voorrangsregels overgenomen die zijn genoemd in de VISSIM handleiding. De instellingen volgens de VISSIM handleiding zijn weergegeven in Tabel 45. De verklaring van de nummers is te vinden in Figuur 37.

Tabel 45: Standaard instellingen voorrangsregels

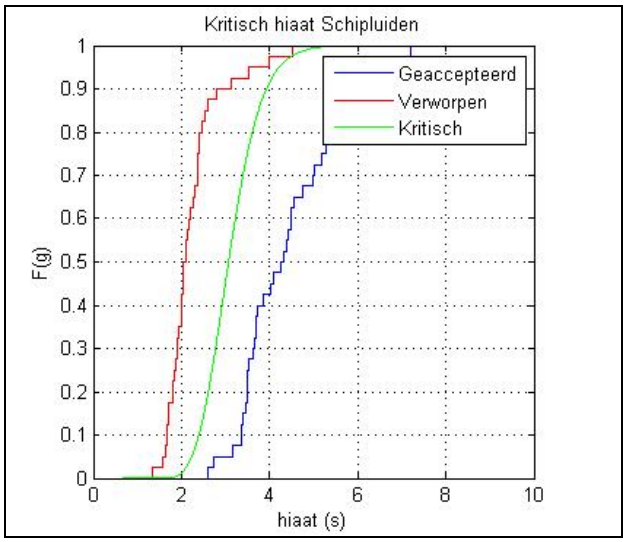
voorrangsregel nr.	min. gap time [s]	min. headway [m]	max. speed [km/u]	red	green
1	2,6	0	180	Alle	Alle
2	0	5	14	Alle	Alle
3	0	5	180	Alle	Alleen vrachtverkeer
4	3,0	0	180	Alleen vrachtverkeer	Alle
5	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-



Figuur 37: ligging voorrangsregels

De voorrangsregels met de nummers 5 en 6 zijn toegevoegd aan de standaard regels om het rijgedrag realistischer te maken. Deze extra verkeersregels hebben betrekking op het verkeer op de rotonde. Dit verkeer hoeft in principe geen voorrang te geven aan verkeer dat de rotonde oprijdt maar in de praktijk komt vaak voor dat vooral vrachtwagens op de toerit voorrang nemen waardoor het rotondeverkeer moet afremmen. Om deze situatie ook in de simulatie na te kunnen bootsen is een extra stopstreep gelegd (nummer 5-6). Volgens deze verkeersregels moet verkeer op de rotonde voorrang verlenen aan invoegend verkeer, indien er in het gebied na de stopstreep op de toerit zich een voertuig bevindt die rijdt met een snelheid kleiner dan 14 km/u, en of behoort tot de categorie vrachtverkeer. De instellingen die voor de extra regels zijn aangehouden zijn gelijk aan de voorrangsregels 2 & 3.

Na de eerste run is gebleken dat de door VISSIM aanbevolen instellingen redelijke resultaten geven. Het hiaat van voorrangsregel 1 is met 0,1s verminderd om het kritisch hiaat iets kleiner te maken. Dit resulteert in de kritisch hiaat verdeling zoals getoond in Figuur 5. De parameters van de verdelingen uit VISSIM en de gemeten data zijn weergegeven in Tabel 4. Uit de resultaten blijkt dat het model goede resultaten geeft.



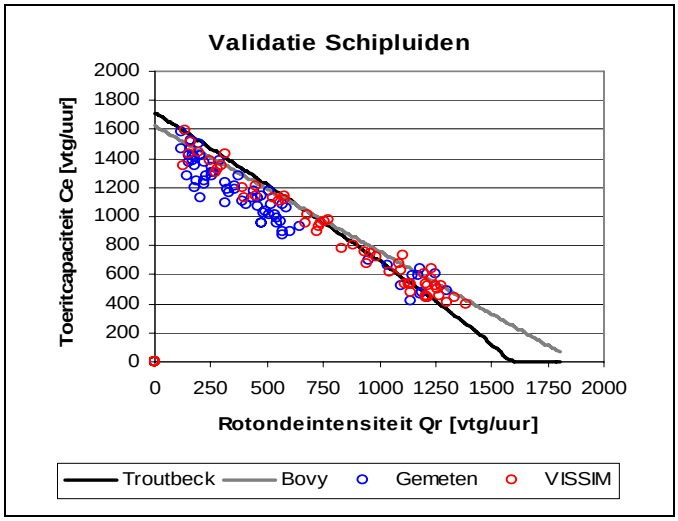
Figuur 5: kritisch hiaat verdeling uit VISSIM

Tabel 4: Kritisch hiaat

	Gemiddelde	St. deviatie
Gemeten	3,14	0,271
VISSIM	3,13	0,373

1.5 Validatie van het model

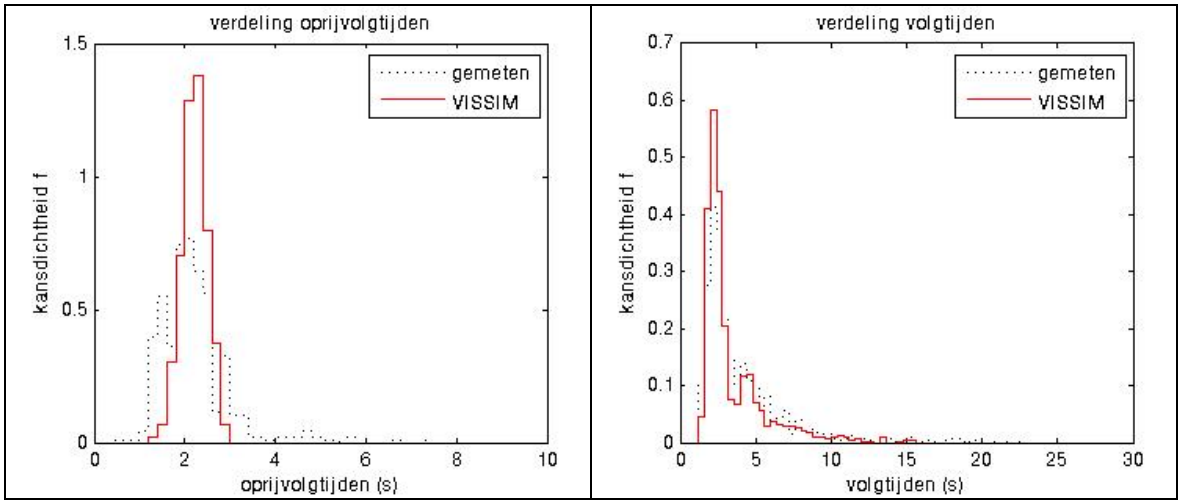
Het model wordt gevalideerd door de gesimuleerde rotonde-intensiteit en de daarbij behorende toeritcapaciteit te vergelijken met de gemeten capaciteiten. Voor de rotonde van Schipluiden zijn metingen uitgevoerd in de ochtend- en avondspits. De resultaten van deze meting, zoals ook vermeld voor het analytische model, zijn weergegeven in een grafiek, in combinatie met de lijnen van de capaciteitsformules. Door de resultaten van de VISSIM simulatie ook in deze grafiek te zetten kunnen de uitkomsten vergeleken worden. Voor de VISSIM simulatie zijn drie simulaties van de ochtendspits en drie van de avond spits gedaan met verschillende random seeds. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 6. Uit het figuur valt af te leiden dat de resultaten van VISSIM overeenkomen met de resultaten uit de praktijkmetingen. Hieruit volgt dat het model resultaten genereert die vergelijkbaar zijn met de praktijk. Het model voor de enkelstrooksrotonde is geschikt voor verder onderzoek.



Figuur 6: Vergelijking resultaten uit VISSIM en praktijkmetingen

1.6 Toepassing van instellingen op Bergschenhoek

Een extra validatie wordt gedaan door de gekalibreerde instellingen van Schipluiden toe te passen op Bergschenhoek. De rotonde van Bergschenhoek heeft een grotere rotondediameter en een bredere middengeleider waardoor de snelheid op de rotonde, ongeveer 5 km/u, hoger ligt en de invloed van het schijnconflict kleiner is.
De rotonde van Bergschenhoek is op dezelfde manier gemaakt als de rotonde van Schipluiden. Bij afstelling van het schijnconflict is gebleken dat op deze rotonde het schijnconflict geen invloed heeft op het oprijdende verkeer. Dit is ook gevonden bij het analytische model.
De verdelingen van de volgtijden en de oprijvolgtijden zijn vergeleken met de verdelingen uit de praktijkmeting en zijn weergegeven in Figuur 40.



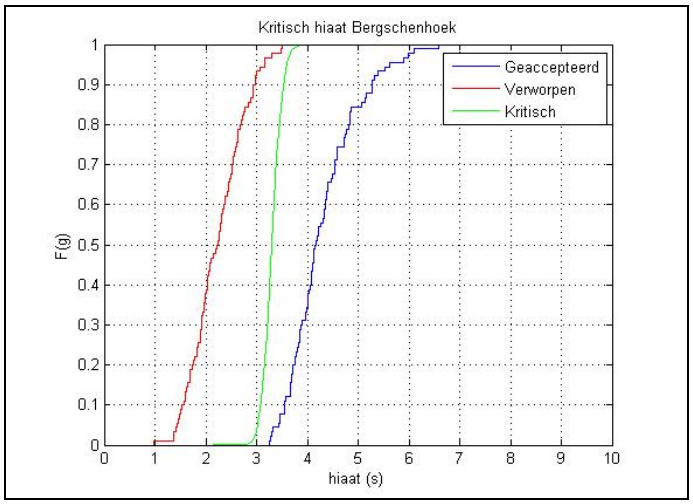
Figuur 40: Links: oprijvolgtijdverdeling Bergschenhoek, Rechts: volgtijdverdeling Bergschenhoek

Tabel 47: Vergelijking statistische gegevens (oprij)volgtijdverdelingen

	Oprijvolgtijd			Volgtijd	
	Mediaan	**St. deviatie**		**t_M**	**St. deviatie**
Gemeten	1,80	0,792	**Gemeten**	2,09	0,503
VISSIM	2,01	0,285	**VISSIM**	2,00	0,382

Uit de resultaten blijkt dat de grootste afwijking zit in de oprijvolgtijd. Het verschil tussen de twee medianen is 0,2 seconden en ook de spreiding wijkt af. Wanneer de gemiddelden worden vergeleken blijkt dit wel overeen te komen, deze waarden zijn 1,99 voor gemeten data en 2,01 voor de VISSIM data. Dit is ook terug te zien in de verdelingen. De waarden voor de volgtijd komen wel goed overeen.

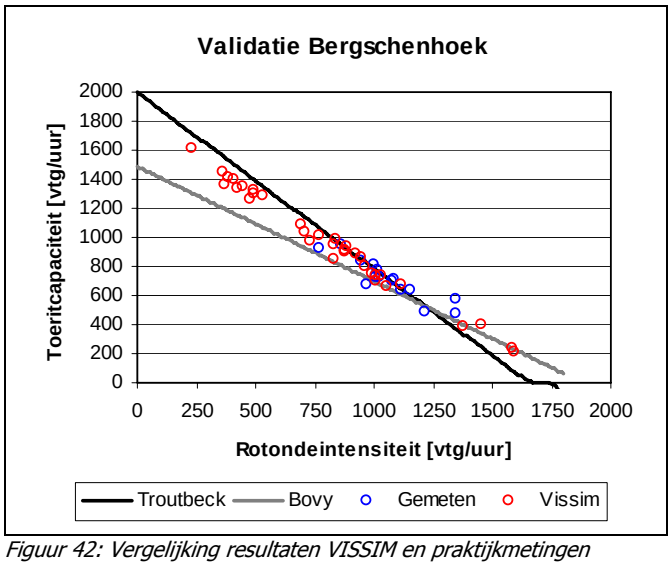
De verdeling van het kritisch hiaat uit de VISSIM simulatie is getoond in Figuur 41. De statistische gegevens voor deze verdeling zijn weergegeven in Tabel 48.



Figuur 41: Kritisch hiaat verdeling uit VISSIM

Tabel 48: Kritisch hiaat		
	Gemiddelde	**St. deviatie**
Gemeten	3,44	0,397
VISSIM	3,30	0,030

Uit de resultaten blijkt dat het gesimuleerde kritisch hiaat redelijk overeen komt met het gemeten kritisch hiaat, alleen de spreiding wijkt af. Dit zal waarschijnlijk geen grote invloed hebben op het resultaat aangezien de vorm van de verdelingen van de geaccepteerde en verworpen hiaten die spreiding wel laten zien. De laatste stap in de validatie is het vergelijken van de rotondeintensiteiten en toeritcapaciteiten met de gemeten waarden. Deze vergelijking is weergegeven in Figuur 42. Hieruit blijkt dat de simulatieresultaten overeenkomen met de gemeten waarden. Daarnaast is te zien dat vanwege de geringe hoeveelheid gemeten data in een klein gebied, de lijnen van de capaciteitsformules afwijken van de gesimuleerde capaciteiten. Dit is te wijten aan de lagere waarde voor de oprijvolgtijd. Algemeen kan worden gesteld dat de gekalibreerde VISSIM instellingen betrouwbare resultaten opleveren op verschillende soorten enkelstrooksrotondes.

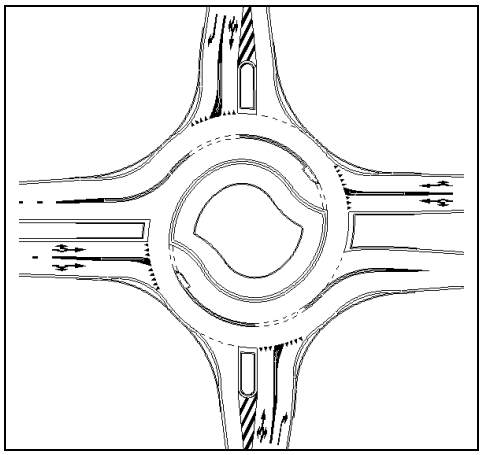


Figuur 42: Vergelijking resultaten VISSIM en praktijkmetingen

1.7 Kalibratieresultaten turborotonde

De gekalibreerde instellingen van VISSIM geven betrouwbare simulatieresultaten voor de enkelstrooksrotondes. Nu is de vraag of deze instellingen ook betrouwbare simulatieresultaten geven voor een turborotonde. De grootste verschillen tussen de enkelstrooksrotonde en de turborotonde zijn de twee rotondestroken, de dubbele toeritten en de grotere rotondediameter. Aangenomen wordt dat er ook belangrijke overeenkomsten zijn. Aangenomen wordt dat het verkeer zowel het invoegen van de rechter toerit naar de buitenste rotondestrook, als het kruisen van een rijstrook, hetzelfde benaderd als het invoegen op een enkelstrooksrotonde. Voor deze twee situaties worden dezelfde voorrangsregelinstellingen gebruikt als voor de enkelstrooksrotonde. De overgebleven invoegbeweging, het invoegen naar de binnenste rijstrook van de rotonde, zal wel afwijken van de enkelstrooksrotonde[1]. Voor deze invoegbeweging zullen nader te bepalen instellingen worden gebruikt.

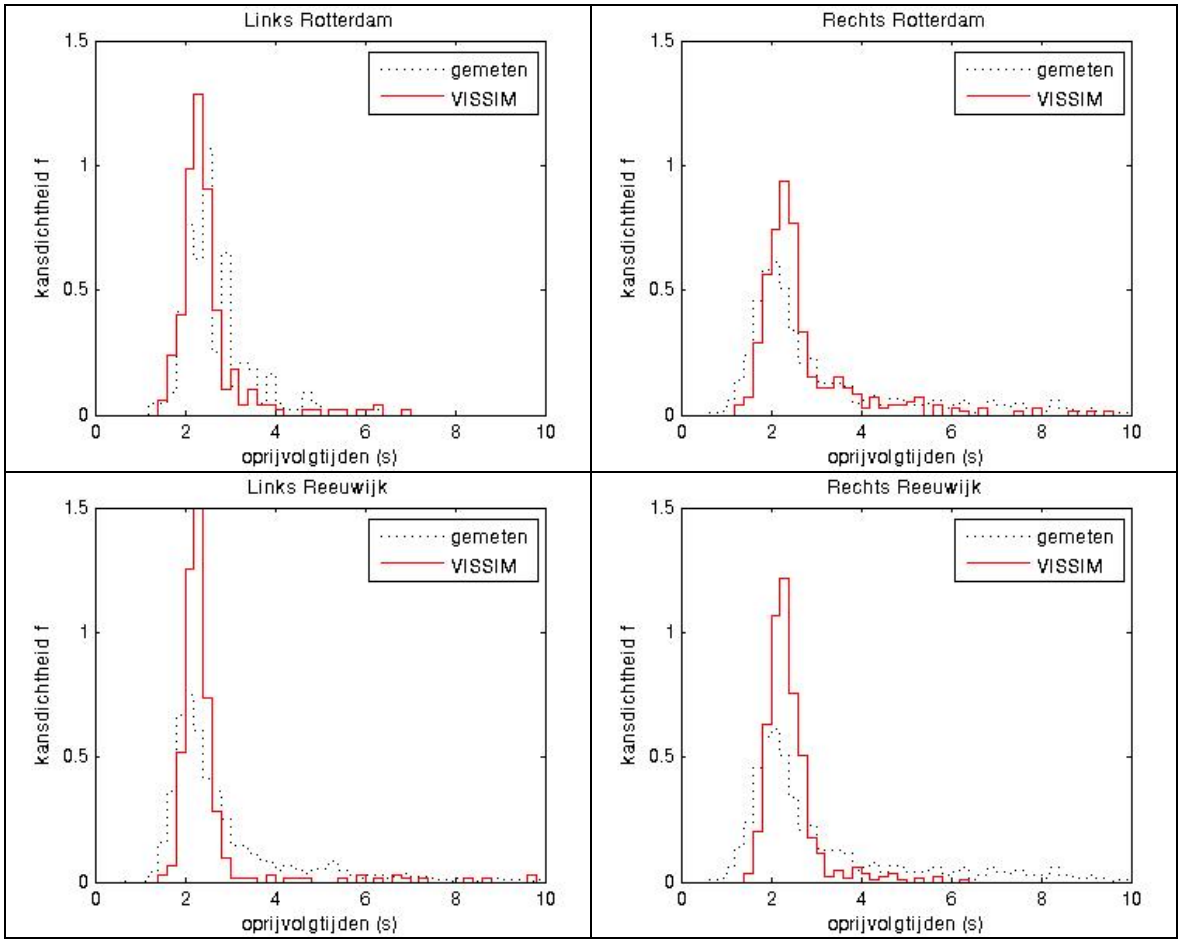
Voor de opbouw van de turborotonde is dezelfde methode gebruikt als bij de enkelstrooksrotonde. De eerste stap in de validatie van de turborotonde is het controleren van de invloed van het schijnconflict. Dit is wederom gedaan door twee verkeersstromen in tegengestelde richting te laten rijden. Hieruit is gebleken dat het schijnconflict op de juiste manier in rekening is gebracht.



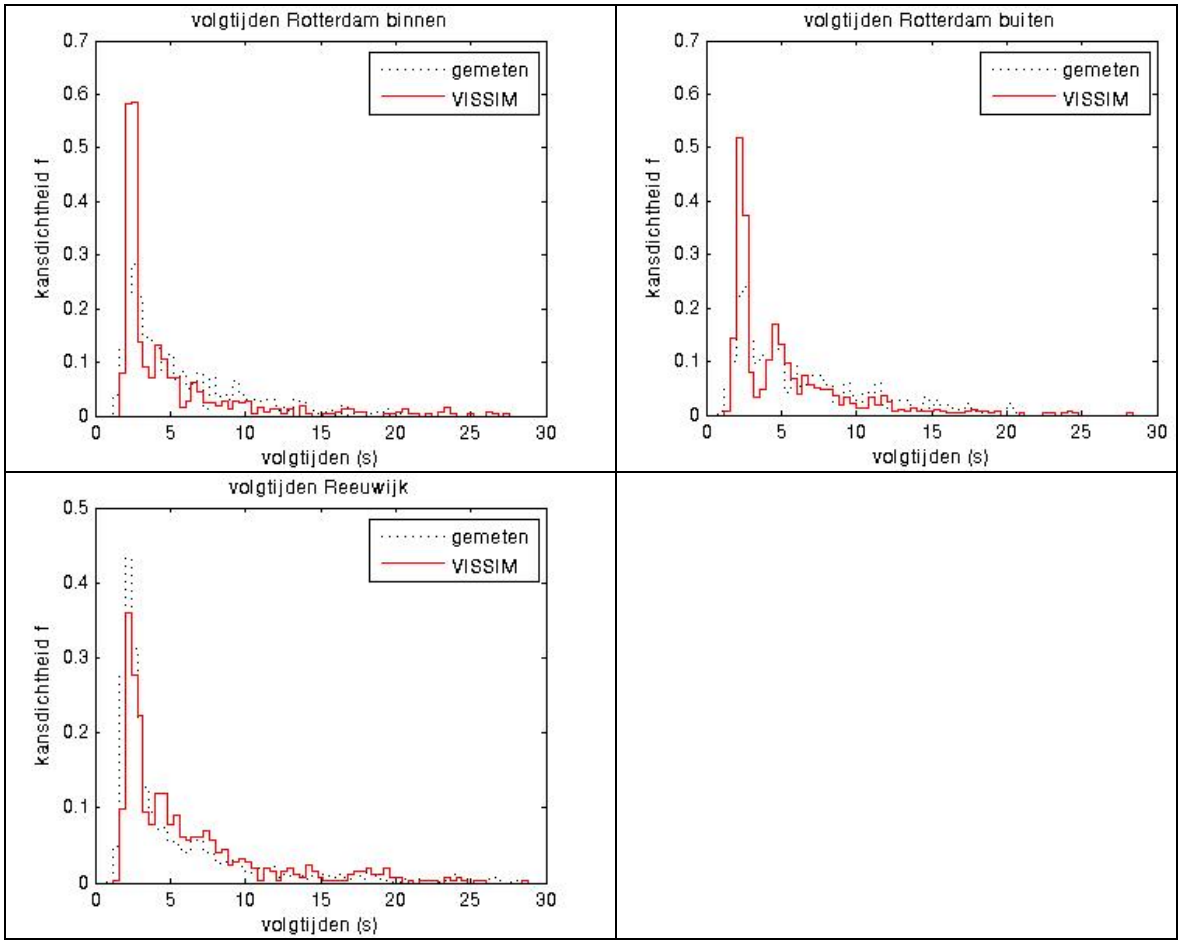
Figuur 43: overzicht turborotonde

[1] Dit is gebleken uit het onderzoek voor het analytische model.

Na de vergelijking van het schijnconflict is gekeken naar het rijgedrag op de rotonde aangaande volgtijd en oprijvolgtijd. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 44 en Figuur 45. Hierbij dient opgemerkt te worden dat er geen meetgegevens beschikbaar zijn van de rechter toerit van Rotterdam. De getoonde verdeling is die van "Rechts Reeuwijk" en dient slechts ter indicatie. Deze is dus niet geschikt voor het trekken van conclusies.



Figuur 44: Oprijvolgtijden op verschillende toeritten op de turborotonde



Figuur 45: Volgtijden op verschillende rotondestroken op de turborotonde

De parameters behorende bij de verdelingen zijn weergegeven in de Tabel 49.

Tabel 49: vergelijking statistische gegevens (oprij)volgtijdverdelingen

Oprijvolgtijd		
	Mediaan	**St. deviatie**
Links Rotterdam		
Gemeten	2,30	0,807
VISSIM	2,13	0,771
Rechts Rotterdam		
Gemeten	-	-
VISSIM	2,16	1,623
Links Reeuwijk		
Gemeten	2,16	1,565
VISSIM	2,06	1,537
Rechts Reeuwijk		
Gemeten	2,15	1,895
VISSIM	2,09	1,049

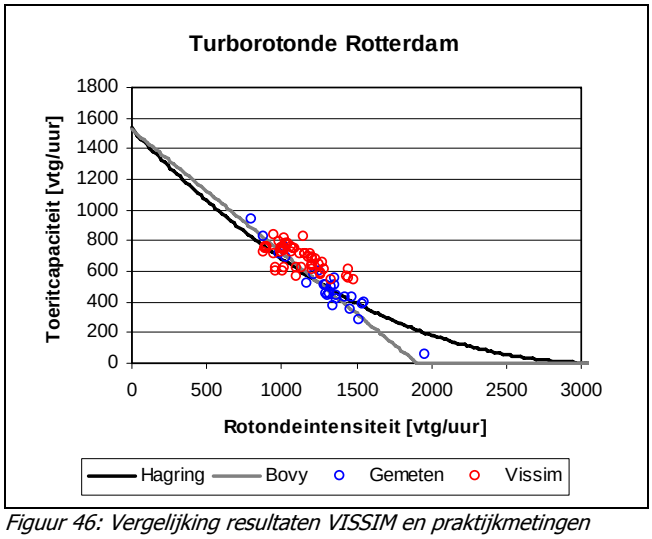
Volgtijd		
	t_M	**St. deviatie**
Rotterdam binnen		
Gemeten	2,46	0,620
VISSIM	2,32	0,436
Rotterdam buiten		
Gemeten	2,42	0,644
VISSIM	2,07	0,296
Reeuwijk		
Gemeten	2,24	0,569
VISSIM	2,36	0,503

De verdelingen van de oprijvolgtijden uit VISSIM vallen niet allemaal overtuigend samen, alleen de oprijvolgtijdverdeling van de linker toerit van Rotterdam komt overeen met de gemeten verdeling. De volgtijdverdelingen lijken wel goed op elkaar te liggen. Wanneer wordt gekeken naar de statistische gegevens voor de oprijvolgtijd geeft alleen de spreiding van de verdeling van "Reeuwijk rechts" een afwijking. Bij de parameters van de volgtijdverdelingen geeft alleen de volgtijdverdeling op de buitenste rotondestrook te Rotterdam een afwijking. Dit zou kunnen komen omdat de gemeten data niet optimaal geschikt zijn voor het bepalen van de minimale volgtijd.

De verdelingen van het kritisch hiaat zijn niet getoond maar de statistische gegevens in Tabel 50 geven aan dat er behoorlijke afwijkingen optreden. Deze resultaten zijn verkregen na kalibratie van de voorrangsregels op de binnenste rotondestrook. Blijkbaar is er iets raars aan de hand op de turborotonde aangaande het kritisch hiaat. Wat de oorzaak hiervan is moet nader worden onderzocht.

Tabel 50: Kritisch hiaat		
Rotterdam-links-binnen		
	Gemiddelde	**St. deviatie**
Gemeten	3,12	0,400
VISSIM	3,08	0,252
Rotterdam-links-buiten		
	Gemiddelde	**St. deviatie**
Gemeten	3,56	1,029
VISSIM	3,84	0,116
Rotterdam-rechts		
	Gemiddelde	**St. deviatie**
Gemeten	-	-
VISSIM	4,02	2,701
Reeuwijk-links		
	Gemiddelde	**St. deviatie**
Gemeten	3,76	0,651
VISSIM	3,64	0,856
Reeuwijk-rechts		
	Gemiddelde	**St. deviatie**
Gemeten	3,75	1,017
VISSIM	3,44	0,050

Een laatste vergelijking is het vergelijken van de gemeten capaciteiten met de capaciteiten uit VISSIM. Deze vergelijking is weergegeven in Figuur 46. Vanwege de niet overtuigende overeenkomsten in rijgedrag is alleen een simulatie gedaan met de intensiteiten zoals die zijn gemeten. Deze simulatie is met twee verschillende random seeds gedaan. Uit Figuur 46 valt te concluderen dat de door VISSIM gegenereerde capaciteiten iets hoger liggen dan de praktijkwaarden. Wat de oorzaak hiervan is moet nader worden onderzocht.



Figuur 46: Vergelijking resultaten VISSIM en praktijkmetingen

Bijlage D

Deze bijlage bevat de onderzoeksresultatenresultaten van het simulatiemodel.

Inhoud

1 GEDETAILLEERDE ONDERZOEKSRESULTATEN SIMULATIEMODEL 1

1.1 OORZAAK VAN HET WAARNEMEN VAN VERSCHILLENDE KRITISCH HIATEN 1

1.1.1 Invloed verkeersverdeling op kritisch hiaat 1
1.1.2 Invloed rotondesnelheid op kritisch hiaat 1
1.1.3 Invloed oprijlengte op kritisch hiaat 1

1.2 HET FUNCTIONEREN VAN DE ROTONDE ONDER EXTREME BELASTINGEN 2

1.3 INVLOED VERDELING ROTONDEVERKEER OVER TWEE ROTONDESTROKEN 3

1.4 RELATIE TUSSEN ROTONDE-INTENSITEIT EN PERCENTAGE VRIJ RIJDEND VERKEER 4

1.5 INVLOED VAN SNELHEID OP DE CAPACITEIT 5

1.6 INVLOED VAN DE ROTONDEDIAMETER OP DE CAPACITEIT 6

1.7 INVLOED VAN RICHTINGSVERDELING OP DE CAPACITEIT 7

1.8 EVALUATIE VAN DE MODELPARAMETERS VAN HET ANALYTISCH MODEL 8

1.8.1 Evaluatie standaard enkelstrooksrotonde 9
1.8.2 Evaluatie enkelstrooksrotonde Bergschenhoek 10
1.8.3 Evaluatie linker toeritstrook met twee rotondestroken van standaard turborotonde 11
1.8.4 Evaluatie overige toeritten van turborotonde 12
1.8.5 Conclusies 13

1 Gedetailleerde onderzoeksresultaten simulatiemodel

In deze paragraaf zullen de resultaten worden gegeven van de onderzochte punten.

1.1 Oorzaak van het waarnemen van verschillende kritisch hiaten

Dit onderzoekspunt bestaat uit de volgende drie subonderzoeken:

- Invloed van de verdeling van het verkeer over de rotondestroken op het kritisch hiaat;
- Invloed van de snelheid op de rotonde op het kritisch hiaat;
- Invloed van de oprijlengte op het kritisch hiaat.

1.1.1 Invloed verkeersverdeling op kritisch hiaat

Het onderzoek is verricht door het rotondeverkeer, met een totale intensiteit van 2400 vtg/h, in verschillende verdelingen over de rotonde te laten rijden. Voor elke verdeling is vervolgens een kritisch hiaat voor binnen en buiten brekend.
De gebruikte verdelingen en de daarbij berekende kritisch hiaten zijn weergegeven in Tabel 51.

Tabel 51: invloed verkeersverdeling		
Q_R=2400 vtg/h		
verdeling [%] binnen - buiten	**t_{C_binnen}**	**t_{C_buiten}**
10-90	-	2,8
30-70	2,7	2,8
50-50	3,2	2,9
70-30	3,1	3,3
90-10	3,1	4,2

Te zien is dat het kritisch hiaat voor de buitenste rijstrook groter wordt naarmate er in verhouding meer verkeer op de binnenste rijstrook gaat rijden. Dit is waarschijnlijk de oorzaak van het verschil in de kritisch hiaten die zijn berekend uit de praktijkwaarnemingen.

1.1.2 Invloed rotondesnelheid op kritisch hiaat

Dit onderzoek is verricht door het verkeer gelijkmatig verdeeld over de rotondestroken te laten rijden met verschillende snelheden.

Tabel 52: invloed snelheid		
Q_R=2400 vtg/h		
snelheid [km/u]	**t_{C_binnen}**	**t_{C_buiten}**
25	3,2	3,3
35	3,2	2,9
50	3,6	3,3

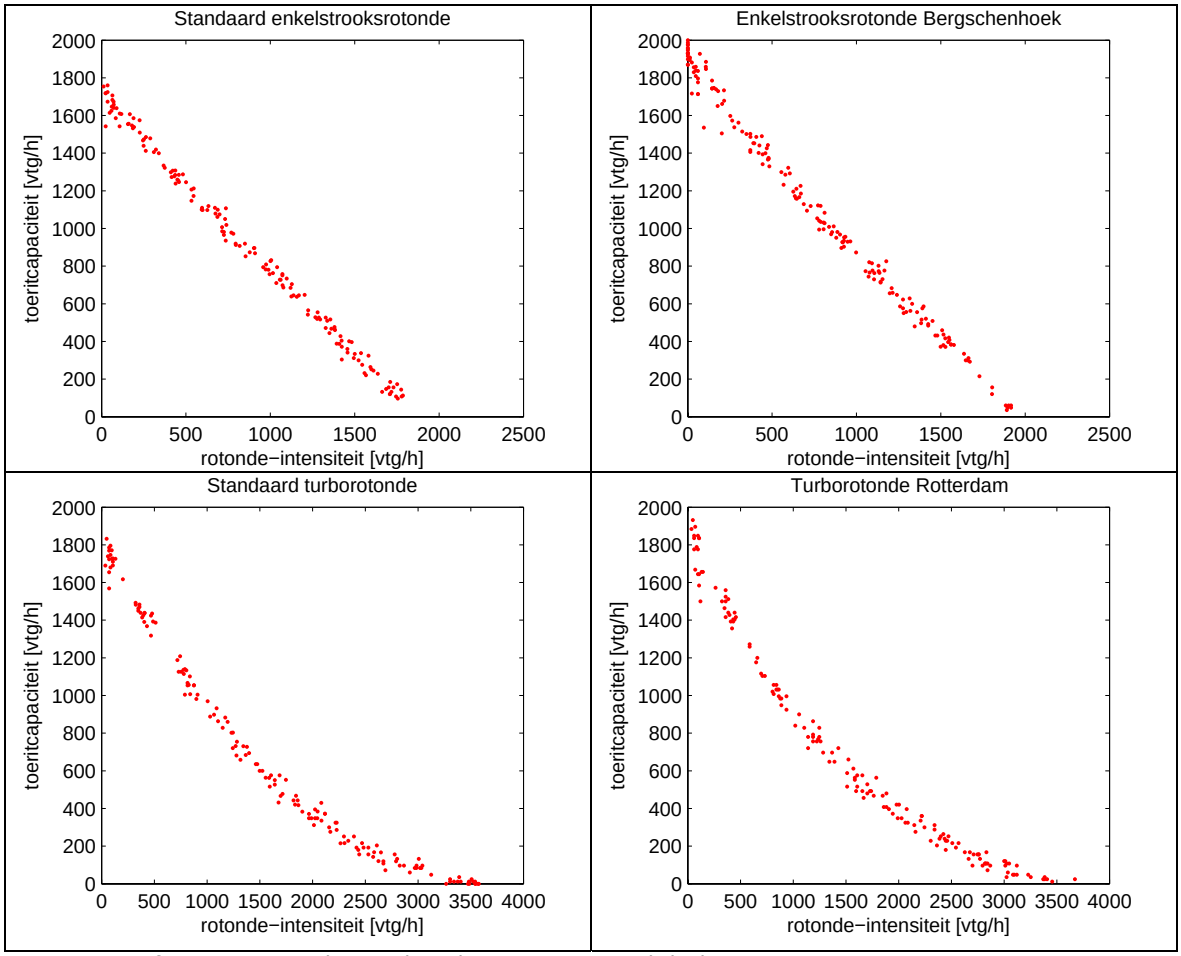
De waarden in Tabel 52 tonen aan dat de snelheid op de rotonde niet van grote invloed is op het kritisch hiaat. Alleen bij een snelheid van 50 km/u neemt het kritisch hiaat voor de binnenste rijstrook een hoge waarde aan. Dit verklaart dus niet het verschil in kritisch hiaat uit de praktijkwaarnemingen, waar het kritisch hiaat op de buitenste rijstrook hoger werd in plaats van op de binnenste rijstrook.

1.1.3 Invloed oprijlengte op kritisch hiaat

De invloed van de oprijlengte is onderzocht aan de hand van een nieuw model met slechts een doorgaande rijstrook als rotondestrook en een invoegende rijstrook als toerit. De toerit is op dezelfde wijze gelegd als de toerit van de turborotonde om eventuele afwijkingen te voorkomen. In dit model is de stopstreep op de toerit verschoven waardoor de oprijlengte wordt verlengd.
Uit dit onderzoek volgde dat de invloed van de oprijlengte marginaal is.

1.2 Het functioneren van de rotonde onder extreme belastingen

De prestaties van de rotondes bij extreme verkeersbelastingen wordt onderzocht door in het model de rotonde-intensiteit over het hele bereik [0,1800] [vtg/h] per rijstrook te laten variëren. Dit is gedaan voor de standaard enkelstrooksrotonde, enkelstrooksrotonde Bergschenhoek, standaard turborotonde en turborotonde Rotterdam. De in VISSIM gemeten rotonde-intensiteiten en toeritcapaciteiten zijn weergegeven in Figuur 47.

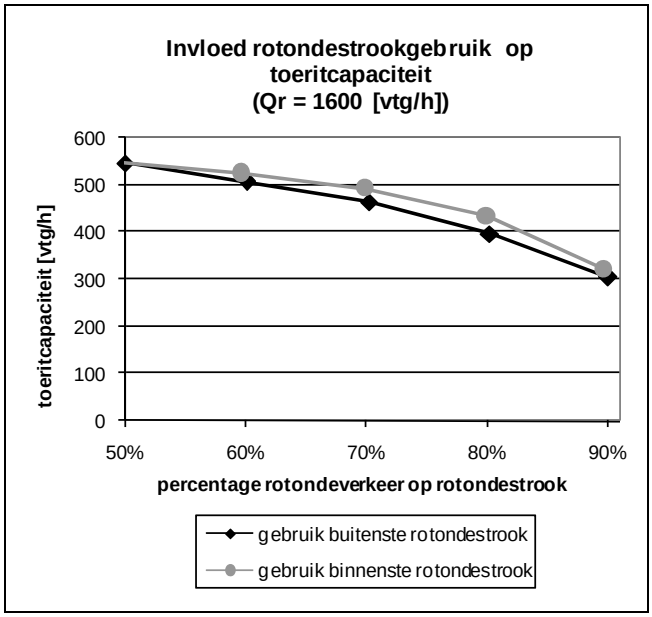


Figuur 47: Het functioneren van de rotonde onder extreme omstandigheden

Uit de figuren blijkt dat het verband tussen de rotonde-intensiteit en de toeritcapaciteit op een enkelstrooksrotonde redelijk lineair is. Op een turborotonde is dit verband niet lineair en kan waarschijnlijk het best beschreven worden met een hiaatacceptatiemodel.

1.3 Invloed verdeling rotondeverkeer over twee rotondestroken

De invloed van de verdeling van het rotondeverkeer over de twee rijstroken is onderzocht door het verkeer in verschillende verdelingen over de rotonde te laten rijden. De resultaten van het onderzoek zijn op twee manieren weergegeven. De eerste manier is weergegeven in Figuur 48.

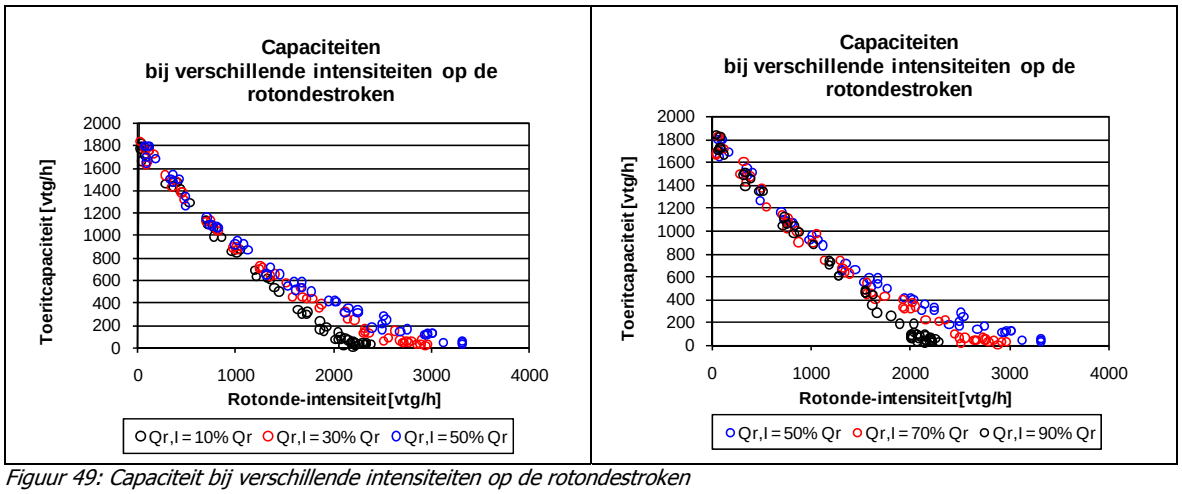


Figuur 48: invloed rotondestrookgebruik op toericapaciteit

Uit Figuur 48 vallen twee dingen af te leiden:

1. Een onevenredige verdeling van het verkeer heeft een negatieve invloed op de capaciteit
2. Een onevenredige verdeling met het meeste verkeer op de buitenste rotondestrook heeft een grotere invloed dan meer verkeer op de binnenste rotondestrook.

De tweede manier waarop de resultaten zijn weergegeven is getoond in Figuur 49.

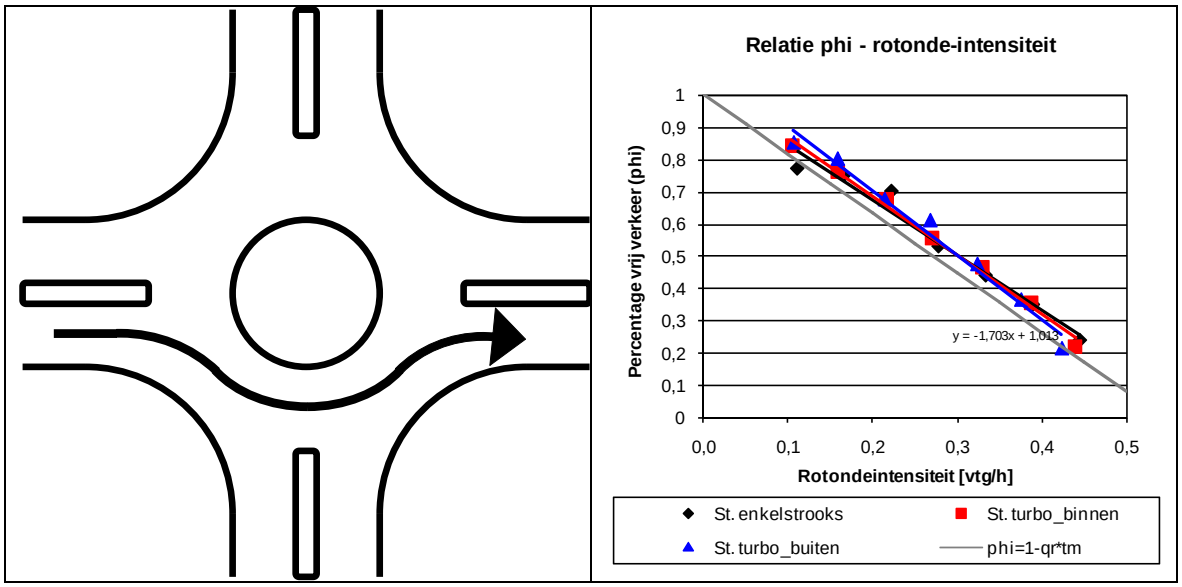


Figuur 49: Capaciteit bij verschillende intensiteiten op de rotondestroken

In Figuur 49 is de invloed van een onevenredige verdeling van het verkeer over de rotondestroken weergegeven voor het hele bereik van de intensiteit. Ook hier is te zien dat de optimale capaciteit wordt gevonden bij een evenredige verdeling van het verkeer. Naarmate het verkeer ongelijker verdeeld wordt over de rotondestroken, neemt de capaciteit af.

1.4 Relatie tussen rotonde-intensiteit en percentage vrij rijdend verkeer

De relatie tussen de rotonde-intensiteit en het percentage vrij rijdend verkeer is bepaald door het verkeer met verschillende intensiteiten over de rotonde te laten rijden. Door maar één stroom in één richting over de rotonde te laten rijden, zoals getoond in Figuur 50, worden de invloeden van andere stomen geëlimineerd. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 50.



Figuur 50: Relatie tussen percentage vrij rijdend verkeer en rotondeintensiteit

Uit het figuur valt af te leiden dat de relaties voor de onderzochte rotondetypen nagenoeg aan elkaar gelijk zijn. De functie waarmee de relaties gezamenlijk het beste worden beschreven is:

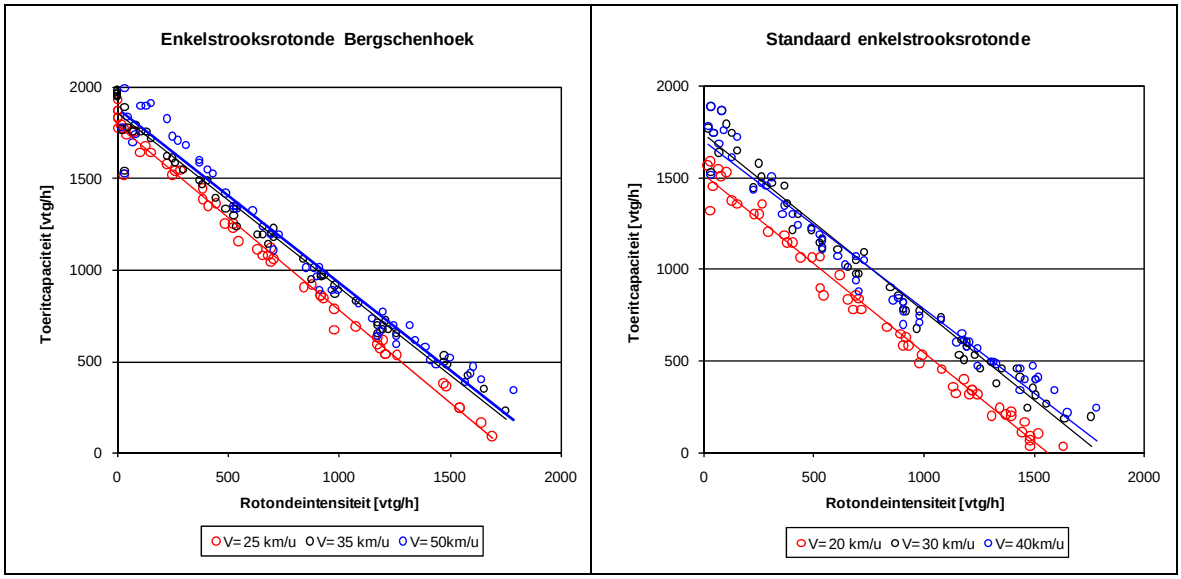
$$\varphi = -1{,}84 * q_R + 1{,}06$$

Wat opvalt aan deze relatie is de waarde van 1,06 voor het intercept. Dit zou betekenen dat bij een zeer geringe rotonde-intensiteit het percentage vrij verkeer boven de 100% zou komen te liggen. Waarschijnlijk is de relatie beter te beschrijven door een polynoom met een intercept kleiner dan 1 en een neerwaartse afbuiging. Om het analytisch model niet te ingewikkeld te maken wordt echter toch de lineaire relatie aangehouden, omdat deze in het meest relevante gebied goede resultaten geeft.

Ter vergelijking is ook de relatie volgens Tanner weergegeven. Deze relatie ($\varphi=1-q_R*t_M$), voor een t_M van 2,0 seconde, komt niet overeen met de overige relaties.

1.5 Invloed van snelheid op de capaciteit

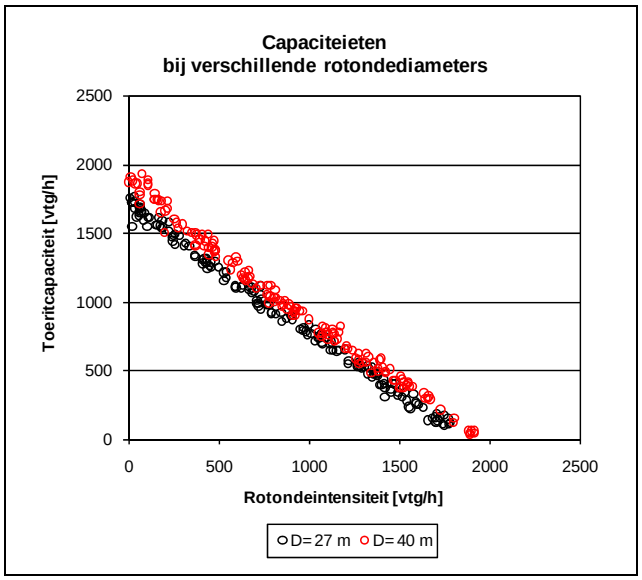
De invloed van de snelheid op de capaciteit is bepaald door het verkeer met een vaste intensiteit over de rotonde te laten rijden en de snelheid te laten variëren. Om deze invloed zo zuiver mogelijk te onderzoeken is gekozen om alleen onderzoek te doen aan de hand van een enkelstrooksrotonde. Op deze manier worden de invloeden van een verdeling over twee rotondestroken geëlimineerd. Het onderzoek is gedaan op de enkelstrooksrotonde van Bergschenhoek en de standaard enkelstrooksrotonde. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 51. Uit de figuren valt af te leiden dat naarmate de snelheid hoger wordt, de capaciteit toeneemt tot een bepaalde hoogte. Deze hoogte kan worden gezien als plafondwaarde. Wanneer de snelheid nog hoger wordt zal de capaciteit weer afnemen.



Figuur 51: Invloed van snelheid op de capaciteit

1.6 Invloed van de rotondediameter op de capaciteit

Zoals eerder beschreven is de rotondediameter van invloed op de snelheid van het verkeer op de rotonde. Een grotere rotondediameter zal leiden tot een hogere snelheid en dus een hogere capaciteit.
De invloed van de rotondediameter is, voor de volledigheid, onderzocht door de capaciteit van de standaard enkelstrooksrotonde te vergelijken met die van Bergschenhoek. De resultaten zijn getoond in Figuur 52. Uit de resultaten valt te concluderen dat een grotere diameter leidt tot een grotere capaciteit. Dit geldt tot een bepaalde diameter. Waar deze grens precies ligt valt niet binnen dit onderzoek.



Figuur 52: Invloed rotondediameter op de capaciteit

1.7 Invloed van richtingsverdeling op de capaciteit

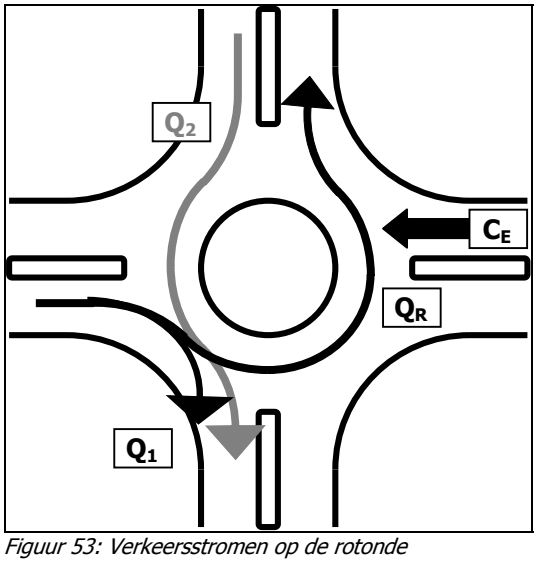
De invloed van de richtingsverdeling op de samenstelling van het verkeer en de invloed van de samenstelling van het verkeer op de capaciteit worden simultaan onderzocht. Aangenomen wordt dat de invloeden voor de turborotonde en de enkelstrooksrotonde gelijk zijn. Hierdoor is het mogelijk om het onderzoek te beperken tot de standaard enkelstrooksrotonde.
Het onderzoek wordt uitgevoerd door verschillende verkeersstromen over de rotonde te laten rijden, te weten:

- Q_R, dit is de hoofdstroom op de rotonde die de capaciteit van de oostelijke toerit bepaalt.
- Q_1, dit is het uitvoegende verkeer van Q_R die wordt gebruikt om hiaten te creëren in Q_R.
- Q_2, dit is de noord-zuid stroom die wordt gebruikt om hiaten te creëren in Q_R.

De stromen zijn zodanig over de rotonde gestuurd dat de toeritcapaciteit niet wordt beïnvloedt door het schijnconflict.

Door te variëren met de intensiteiten van Q_1 en Q_2 wordt de stroom van Q_R verstoord waardoor er hiaten optreden. Aangenomen wordt dat door het onderbreken van de rotondestroom het percentage vrij verkeer wordt beïnvloedt. Daarnaast wordt aangenomen dat een hoog percentage vrij verkeer, bij een gelijkblijvende intensiteit, een hogere toeritcapaciteit tot gevolg heeft.

Uit het onderzoek is gebleken dat, bij een gelijkblijvende intensiteit van het rotondeverkeer, de richtingsverdeling van het verkeer slechts een geringe invloed heeft op het percentage vrije voertuigen in de rotondestroom, en de toeritcapaciteit. Wanneer de intensiteiten van Q_1 en Q_2 de intensiteit van Q_R gaan beïnvloeden, heeft dit wel gevolgen voor de toeritcapaciteit.

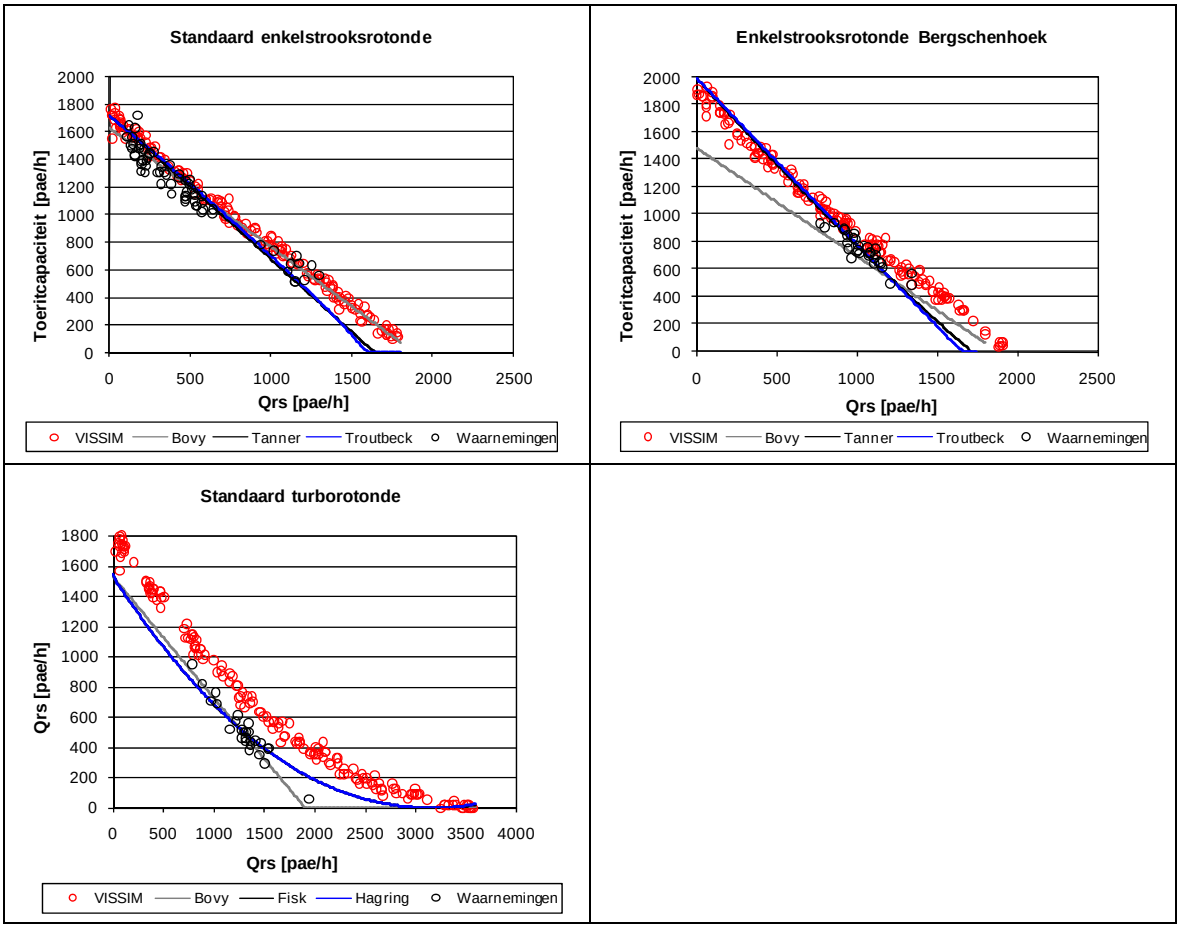


Figuur 53: Verkeersstromen op de rotonde

1.8 Evaluatie van de modelparameters van het analytisch model

De evaluatie van de parameters wordt gedaan door de resultaten van het VISSIM model te vergelijken met de gevonden lijnen van de capaciteitsformules. Dit wordt gedaan voor de standaard enkelstrooksrotonde, de enkelstrooksrotonde van Bergschenhoek en de linker toeritstrook met twee rotondestroken van de standaard turborotonde. Deze vergelijking is getoond in Figuur 54. Merk op dat de intensiteiten worden weergegeven in personenauto-equivalent in plaats van voertuigen. Dit is gedaan vanwege het gebruik van pae-waarden in het onderzoek naar het analytisch model.

Voor de andere typen toeritten van de turborotonde, de rechter toeritstrook en de toerit met één rotondestrook, zijn geen capaciteitswaarden beschikbaar. Voor deze toeritten wordt aangenomen dat het verkeer hetzelfde gedrag vertoont als op de enkelstrooksrotonde van Bergschenhoek, omdat de rotondediameters en de breedte van de middengeleiders vergelijkbaar zijn. Na het evalueren van de toeritten waar wél capaciteitswaarnemingen beschikbaar van zijn, zullen vervolgens de overige twee typen toeritten worden behandeld. Uit de resultaten blijkt dat de resultaten voor de enkelstrooksrotondes redelijk overeenkomen maar zeker voor verbetering vatbaar zijn. De resultaten voor de turborotonde liggen, zoals verwacht, structureel te hoog.
Achtereenvolgens zullen de parameters van de verschillende rotondes worden geëvalueerd.



Figuur 54: Evaluatie van de modelparameters

1.8.1 Evaluatie standaard enkelstrooksrotonde

In Figuur 54 is te zien dat de resultaten voor de standaard enkelstrooksrotonde redelijk overeen komen met de lijnen van de capaciteitsformules die in het onderzoek naar het analytisch model zijn gevonden. De grootste afwijking lijkt het iets te hoog liggen van de VISSIM resultaten. Dit is een vertekend beeld, omdat de simulatie is gedaan zonder afslaand verkeer, dus zonder schijnconflict. Wanneer er wél afslaand verkeer mee wordt gesimuleerd zullen de capaciteiten lager komen te liggen.
Algemeen kan worden gesteld dat de resultaten niet geheel bevredigend overeen komen. Hierdoor is besloten om de parameters opnieuw te bepalen. Eerst zullen de parameters van de formule van Bovy worden bepaald en daarna de parameters van de hiaatacceptatiemodellen.

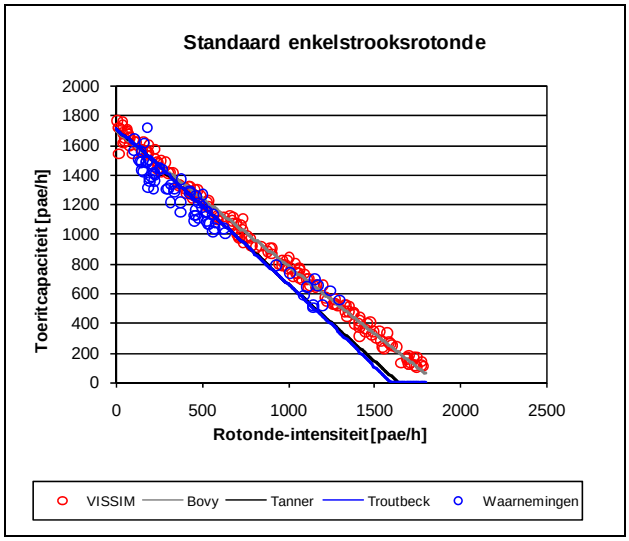
De bepaling van de parameters van de formule van Bovy is in twee stappen gedaan. Eerst worden de parameters C_0 en b geschat uit simulatieresultaten zonder afslaand verkeer. Daarna wordt de invloed van het afslaand verkeer bepaald door de parameter a te schatten uit simulatieresultaten mét afslaand verkeer. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 53.

De bepaling van de parameters voor de hiaatacceptatiemodellen van Tanner en Troutbeck zijn in drie stappen gedaan. De eerste stap is de bepaling van het kritisch hiaat uit data over het hele intensiteitbereik van het rotondeverkeer. De tweede stap is het bepalen van de oprijvolgtijd. Dit is gedaan voor een situatie met weinig rotondeverkeer (500 vtg/h) omdat voor weinig rotondeverkeer de meeste invoegbewegingen plaatsvinden. De intensiteit mag niet te laag zijn omdat het eerste voertuig dat gebruik maakt van een hiaat vanuit stilstand moet invoegen. De laatste stap is het bepalen van de minimum volgtijd. Dit is gedaan voor veel rotondeverkeer (1600 vtg/h) omdat het verkeer dan overwegend dicht achter elkaar rijdt. De resultaten zijn weergeven in Tabel 53.

De gebruikte data is afkomstig uit drie verschillende simulaties met verschillende random seeds. De getoonde waarden zijn de gemiddelden van de drie uitkomsten uit de verschillende simulaties. Een grafische weergave van de capaciteitsformules is gegeven in Figuur 55. Te zien is dat de uitkomsten van de hiaatacceptatiemodellen niet overeenkomen met de capaciteiten zoals bepaald met VISSIM. Ook is te zien dat de afwijking toeneemt, naarmate de rotonde-intensiteit groter wordt.

Tabel 53: modelparameters standaard enkelstrooksrotonde

Parameters Bovy			Parameters hiaatacceptatie	
C_0	1695		t_C	3,1
b	0,91		t_F	2,1
a	0,10		t_M	2,2



Figuur 55: Evaluatie standaard enkelstrooksrotonde

1.8.2 Evaluatie enkelstrooksrotonde Bergschenhoek

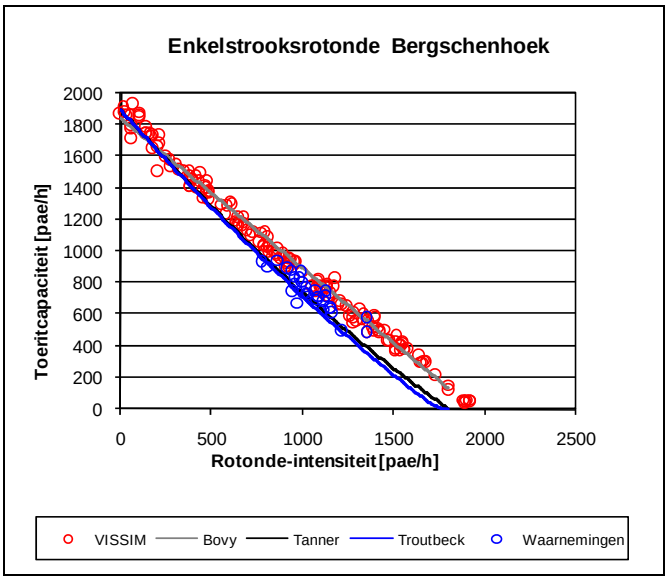
In Figuur 54 is te zien dat, vanwege de beperkte beschikbaarheid van meetgegevens, de resultaten van de capaciteitsformules onderling sterk verschillen. Verder valt te zien dat de uitkomsten van VISSIM in het gemeten intensiteitbereik goed overeenkomen met de gemeten resultaten. Buiten dit intensiteitbereik wijken de resultaten uit de capaciteitsformules af van de VISSIM resultaten. Hierdoor is besloten om de parameters opnieuw te bepalen. Eerst zullen de parameters van de formule van Bovy worden bepaald en daarna de parameters van de hiaatacceptatiemodellen.

De bepaling van de parameters van de verschillende capaciteitsmodellen is op dezelfde wijze gedaan als voor de standaard enkelstrooksrotonde.

De resultaten zijn weergeven in Tabel 54. Een grafische weergave van de capaciteitsformules is gegeven in Figuur 56. Te zien is dat de uitkomsten van de hiaatacceptatiemodellen op dezelfde manier afwijken als bij de standaard enkelstrooksrotonde, de afwijking wordt groter naarmate de rotonde-intensiteit toeneemt.

Tabel 54: modelparameters rotonde Bergschenhoek

Parameters Bovy			**Parameters hiaatacceptatie**	
C_0	1841		t_C	3,4
b	0,95		t_F	1,9
a	0,00		t_M	2,0



Figuur 56: Evaluatie rotonde Bergschenhoek

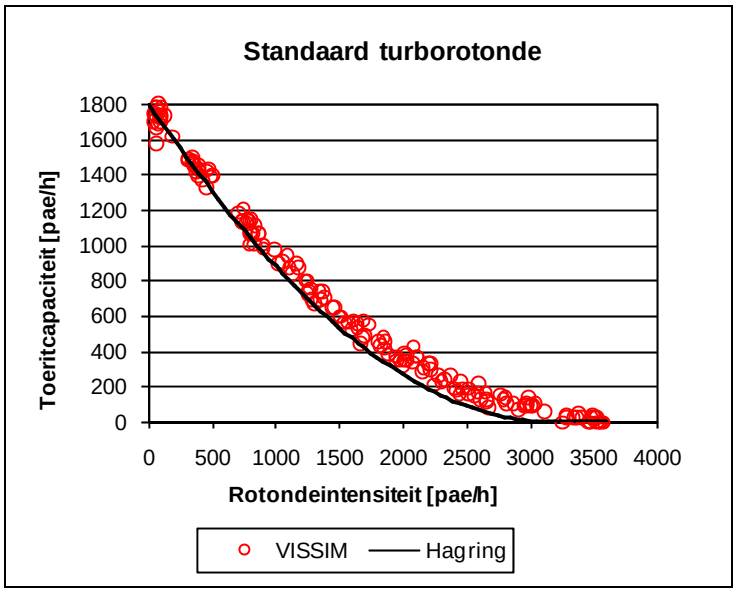
1.8.3 Evaluatie linker toeritstrook met twee rotondestroken van standaard turborotonde

In Figuur 54 is te zien dat de capaciteiten volgens VISSIM afwijken van de meetresultaten. Dit is hoogst waarschijnlijk het gevolg van de ongelijke verdeling van het verkeer over de twee rotondestroken tijdens de meting. De gemeten capaciteiten zijn hierdoor niet te vergelijken met de VISSIM resultaten.

Aangezien de parameters die resulteerden uit het onderzoek naar het analytisch model niet geschikt zijn voor het beschrijven van de VISSIM uitkomsten, worden de parameters opnieuw bepaald. Dit wordt op dezelfde wijze gedaan als voor het analytisch model. De evaluatie is alleen gedaan voor de formule van Hagring. Hiervoor is gekozen omdat uit Figuur 54 blijkt dat de toeritcapaciteit van een turborotonde niet kan worden beschreven met een lineair model. Daarnaast wordt aangenomen dat de parameters voor de hiaatacceptatiemodellen voor alle modellen gelijk zijn.

De resultaten zijn weergegeven in Tabel 55. Een grafische weergave van de capaciteitsformules is gegeven in Figuur 57. Te zien is dat de uitkomsten van de hiaatacceptatiemodellen op dezelfde manier afwijken als bij de enkelstrooksrotondes, de afwijking wordt groter naarmate de rotonde-intensiteit toeneemt.

Tabel 55: modelparameters Standaard turborotonde	
Parameters hiaatacceptatie	
$t_{C\ binnen}$	3,2
$t_{C\ buiten}$	3,0
t_F	2,0
t_M	2,2



Figuur 57: Evaluatie standaard Turborotonde

1.8.4 Evaluatie overige toeritten van turborotonde

De overige toeritten van de turborotonde zijn de rechter toeritstrook en de linker toeritstrook met één rotondestrook. Van deze toeritten zijn geen capaciteitswaarnemingen uit een praktijksituatie voorhanden, waardoor een echte evaluatie niet mogelijk is. Aangenomen wordt dat het verkeer op deze toeritten hetzelfde gedrag vertoont als op de enkelstrooksrotonde van Bergschenhoek, omdat de rotondediameters en de breedte van de middengeleiders vergelijkbaar zijn.

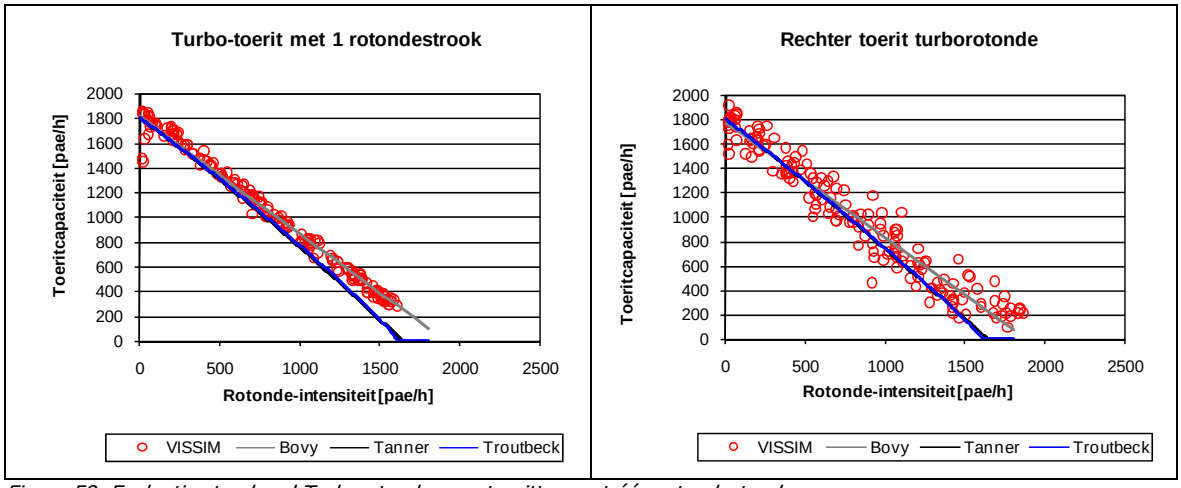
De resultaten zijn weergegeven in Tabel 56 en Tabel 57. Een grafische weergave van de capaciteitsformules is gegeven in Figuur 58. Te zien is dat de uitkomsten van de hiaatacceptatiemodellen op dezelfde manier afwijken als bij de enkelstrooksrotondes, de afwijking wordt groter naarmate de rotonde-intensiteit toeneemt.

Tabel 56: Turbotoerit met 1 rotondestrook

Parameters Bovy			Parameters hiaatacceptatie	
C_0	1811		t_C	2,9
b	0,95		t_F	2,0
a	0,00		t_M	2,2

Tabel 57: Rechter toerit turborotonde

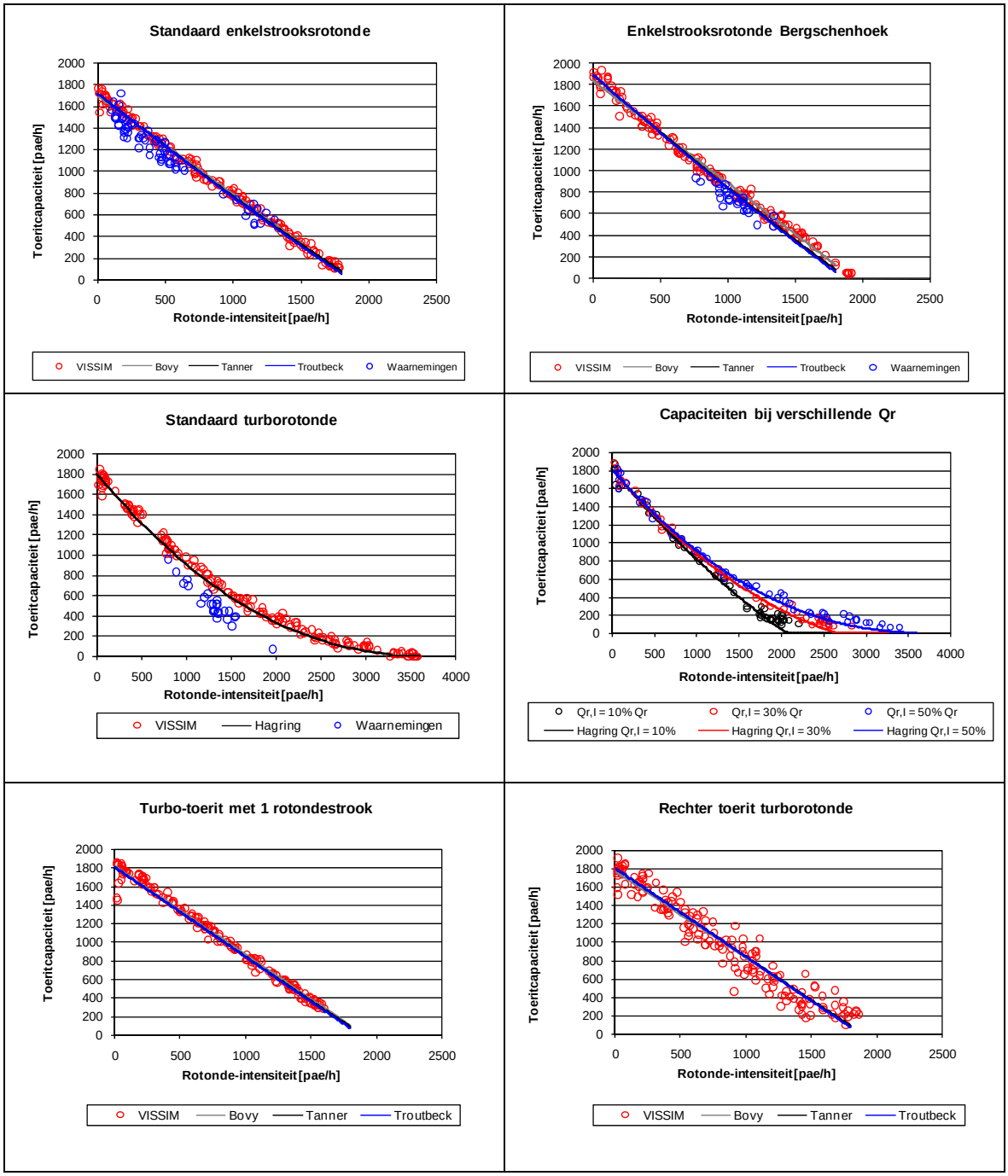
Parameters Bovy			Parameters hiaatacceptatie	
C_0	1767		t_C	3,0
b	0,94		t_F	2,0
a	0,00		t_M	2,2



Figuur 58: Evaluatie standaard Turborotonde voor toeritten met één rotondestrook

1.8.5 Conclusies

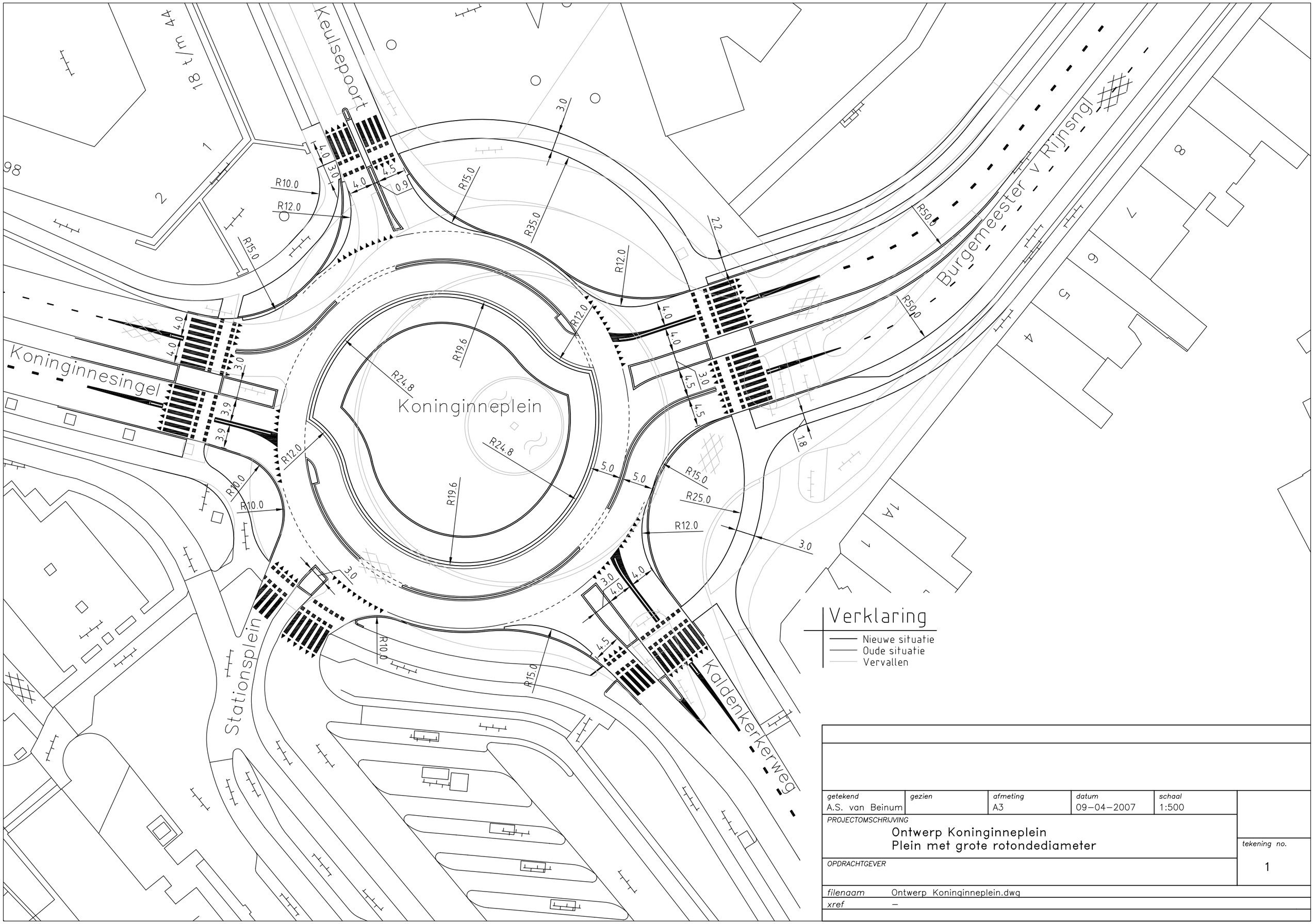
Uit de evaluatie is gebleken dat de capaciteit van een toerit met één rotondestrook goed beschreven kan worden met een lineair model en een toerit met twee stroken met een hiaatacceptatiemodel. Verder valt te concluderen dat in alle gevallen het hiaatacceptatiemodel voor grotere intensiteiten een te lage toeritcapaciteit voorspelt. Dit doet vermoeden dat de paramater t_M, die de capaciteit hoofdzakelijk beïnvloedt bij hogere intensiteiten, onjuist bepaald is. Wanneer de waarde van t_M lager wordt ingevuld, zal de toeritcapaciteit voor hogere intensiteiten hoger worden berekend. Figuur 59 toont de resultaten van de formules bij invulling van t_M=1,9 [s].
Uit de figuren blijkt dat de aangepaste waarde van t_M voor alle gevallen zeer goede resultaten oplevert. Ook voor de turborotondetoerit met twee rotondestroken geeft het hiaatacceptatiemodel, bij verschillende verkeersverdelingen over de rotondestroken, zeer goede resultaten.



Figuur 59: Resultaten van capaciteitsformules met toepassing van een aangepaste minimale volgtijd

Bijlage E

Deze bijlage bevat de tekeningen van het geometrisch ontwerp van de turborotonde voor het Koninginneplein te Venlo.



getekend	gezien	afmeting	datum	schaal
A.S. van Beinum		A3	09–04–2007	1:500

PROJECTOMSCHRIJVING

Ontwerp Koninginneplein
Plein met grote rotondediameter

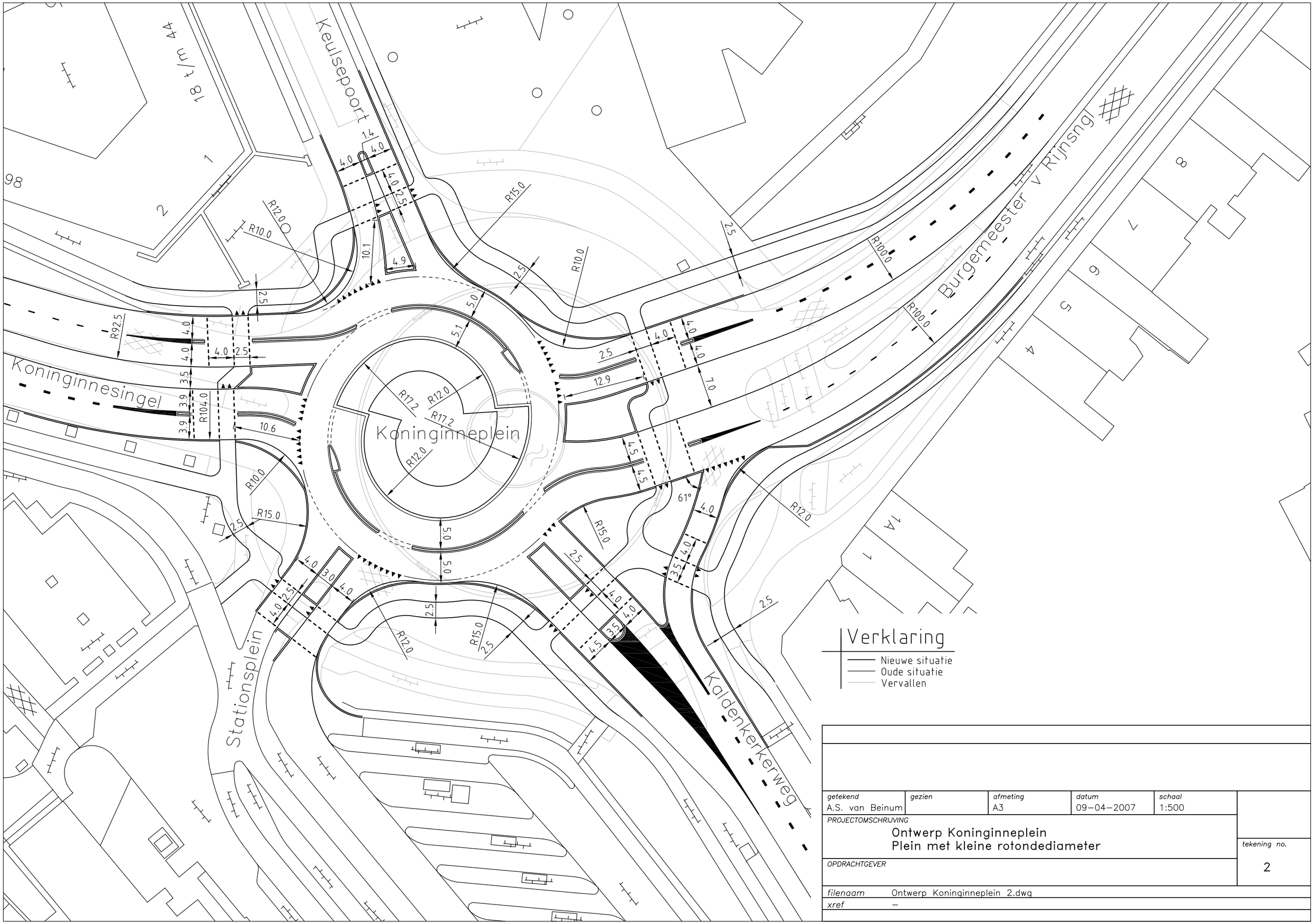
OPDRACHTGEVER

tekening no.

1

filenaam Ontwerp Koninginneplein.dwg

xref –



getekend	gezien	afmeting	datum	schaal	
A.S. van Beinum		A3	09–04–2007	1:500	

PROJECTOMSCHRIJVING

Ontwerp Koninginneplein
Plein met kleine rotondediameter

tekening no. 2

OPDRACHTGEVER

filenaam Ontwerp Koninginneplein 2.dwg

xref –